HORS-SÉRIE Le Monde

Réviser son bac avec Le Monde

2020

TERMINALE, SÉRIE S

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

CAHIER SPÉCIAL
16 pages pour se tester avant le bac

L'ESSENTIEL DU COURS

LES SUJETS CORRIGÉS

LES ARTICLES DU *MONDE*

LES CONSEILS DE RÉVISION

rue des écoles

En partenariat avec MAIF

Réviser son bac avec Le Monde

TERMINALE, SÉRIE S

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Une réalisation de rue des écoles

CAHIER SPÉCIAL
16 pages pour se tester avant le bac

Avec la collaboration de :
Manon Corbin
Sandrine Henry
Florence Le Grand
Marie-Noël Morin-Ganet
Mary Sroda

En partenariat avec MAIF

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Cet ouvrage, consacré au programme spécifique de Sciences de la vie et de la Terre de terminale S et conçu par des professeurs enseignant ce niveau, constitue une préparation originale et efficace à l'épreuve écrite du baccalauréat en SVT.

Pour vous préparer au mieux au baccalauréat, vous trouverez à la fin de l'ouvrage, dans le *Guide pratique*, la présentation détaillée de l'épreuve de SVT, les exigences des correcteurs et des recommandations – y compris des conseils de méthode et d'organisation – pour réussir cette épreuve.

Dans la double page de *L'essentiel du cours*, les principales notions de chaque chapitre, accompagnées de schémas, sont expliquées et présentées de manière structurée et synthétique, dans le respect du contenu et de l'esprit du programme officiel de SVT de terminale S. Au bas des pages sont précisément définis les mots et les notions clés du cours et des zooms sur certains points du programme vous permettent d'approfondir vos connaissances.

Dans *Un sujet pas à pas*, un sujet complet vous est proposé, accompagné de son corrigé et des conseils de l'enseignant sur les principaux pièges à éviter. Pour chaque chapitre, c'est l'un des trois exercices de l'épreuve écrite de SVT qui est traité. L'ensemble des sujets couvre les différents exercices de l'épreuve écrite de SVT au baccalauréat : partie 1 (restituer ses connaissances lors d'une question de synthèse ou d'un QCM), partie 2 exercice 1 (raisonner dans le cadre d'un problème scientifique) et partie 2 exercice 2 (pratiquer une démarche scientifique). Cette rubrique se révèle donc être un outil efficace pour s'entraîner tout au long de l'année à l'épreuve du baccalauréat.

Pour chaque chapitre, des articles issus du quotidien *Le Monde*, ont été sélectionnés pour leur intérêt et leur pertinence au regard d'une ou de plusieurs notions abordées dans le cours. Il s'agit d'articles récents, qui montrent combien les problématiques des Sciences de la vie et de la Terre s'inscrivent dans l'actualité, suscitent des polémiques ou des controverses, que ce soit dans le domaine de la santé ou dans celui de l'environnement. Ces articles montrent également la rapidité de l'évolution des connaissances en biologie et en géologie notamment. Les articles choisis vous permettent d'approfondir les notions du cours, d'étayer vos propos lors des épreuves, grâce à des exemples issus du *Monde*, d'alimenter votre réflexion critique et, finalement, d'appréhender les sciences comme un savoir toujours en construction.

Cet ouvrage est une aide précieuse pour réussir l'épreuve de SVT, et au-delà, pour découvrir la richesse des Sciences de la vie et de la Terre.

M.-N. M.-G.

Message à destination des auteurs des textes figurant dans cet ouvrage ou de leurs ayants-droit : si malgré nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de vous contacter afin de formaliser la cession des droits d'exploitation de votre œuvre, nous vous invitons à bien vouloir nous contacter à l'adresse bucquet@lemonde.fr.

En partenariat avec MAIF

Complétez vos révisions du bac sur www.assistancescolaire.com :
méthodologie, fiches, exercices, sujets d'annales corrigés...
des outils gratuits et efficaces pour préparer l'examen.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Monde CAMPUS

A l'approche du baccalauréat 2020 et durant l'examen, Le Monde Campus vous propose des conseils de lectures et de révisions, des quiz, des directs avec des professeurs, ainsi que les sujets et corrigés des épreuves.

Toute l'année, nos journalistes racontent comment les étudiants et jeunes diplômés se forment, travaillent et changent la société.

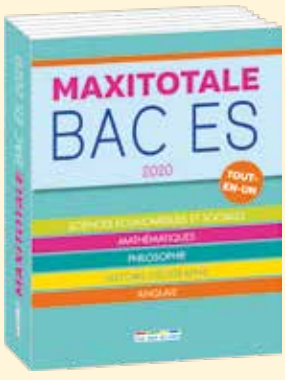
Rendez-vous sur la rubrique **Lemonde.fr/campus** et dans *Le Monde* avec les pages « Le Monde Campus 021 » et les suppléments mensuels « Le Monde Campus ».

Le Monde CAMPUS

MAXITOTALE

29 €

Tout-en-un : les sujets corrigés et commentés des 6 dernières années, les conseils des enseignants, la méthodologie et le programme.



Retrouvez toutes nos collections pour préparer le baccalauréat sur www.ruedesecoles.com

rue des écoles

SOMMAIRE

Génétique et évolution p. 5

chapitre 01 – Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique p. 6

chapitre 02 – Diversification génétique et diversification des êtres vivants p. 12

chapitre 03 – De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité p. 18

chapitre 04 – Un regard sur l'évolution de l'homme p. 24

chapitre 05 – Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes p. 30

Le domaine continental et sa dynamique p. 37

chapitre 06 – La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale p. 38

chapitre 07 – Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs p. 44

chapitre 08 – Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux p. 50

Enjeux planétaires contemporains p. 55

chapitre 09 – Géothermie et propriétés thermiques de la Terre p. 56

chapitre 10 – La plante domestiquée p. 60

Le maintien de l'intégrité de l'organisme : quelques aspects de la réaction immunitaire p. 65

chapitre 11 – La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée p. 66

chapitre 12 – L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée p. 72

chapitre 13 – Le phénotype immunitaire au cours de la vie p. 78

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse p. 83

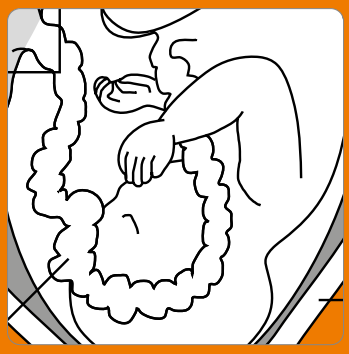
chapitre 14 – Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle p. 84

chapitre 15 – Motricité volontaire et plasticité cérébrale p. 88

Le guide pratique p. 93

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

GÉNÉTIQUE ET ÉVOLUTION



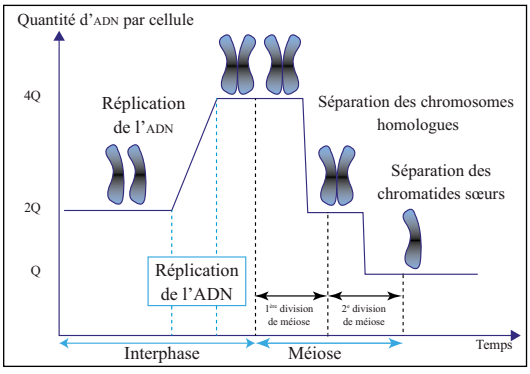
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique

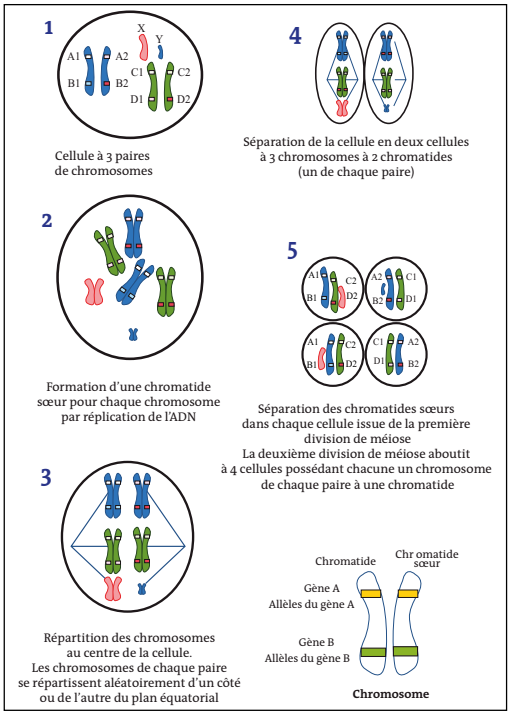
Tous les individus appartenant à une même espèce possèdent le même nombre de chromosomes et les mêmes gènes, occupant la même position le long de l'ADN. Au cours de l'évolution, des mutations peuvent conduire à l'apparition de différentes versions des gènes : les allèles. Différents brassages au cours de la reproduction sexuée expliquent que chaque individu (hormis les jumeaux vrais) soit génétiquement unique, c'est-à-dire possède une combinaison unique d'allèles.

Une multitude de gamètes différents

Chez les organismes diploïdes, la reproduction sexuée implique la formation de cellules reproductrices, ou **gamètes haploïdes**, contenant chacune la moitié de l'information génétique de l'individu qui les produit. À l'exception des gamètes, chacune des cellules d'un organisme diploïde possède des paires de chromosomes homologues : l'un d'origine paternelle et l'autre d'origine maternelle. La première étape de la formation des gamètes est une double division cellulaire appelée **méiose,** qui permet d'obtenir quatre cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde. Elle est précédée d'une copie à l'identique du matériel génétique (**réplication de l'ADN**). Chaque chromosome passe alors d'une chromatide à deux chromatides sœurs. La méiose est une double division cellulaire (2). **La première division de méiose** se déroule en plusieurs étapes. Au cours de la **prophase I**, les chromosomes se condensent, puis **les chromosomes homologues** se placent côte à côte : ils s'apparient. En **métaphase I** (3), les chromosomes se disposent sur le plan équatorial, au centre de la cellule. En **anaphase I**, les deux chromosomes de chaque paire se séparent et



Variation de la quantité de matériel chromosomique lors de la méiose



MOTS CLÉS

ALLÈLES
Versions différentes d'un même gène, caractérisées par de légères différences au niveau de leur séquence nucléotidique.

CHROMOSOMES HOMOLOGUES
Chromosomes appartenant à une même paire dans le caryotype d'une espèce diploïde. Ils portent les mêmes gènes, au même locus, mais pas forcément les mêmes allèles.

DIPLOÏDE (2N)
Qui possède deux représentants homologues de chaque chromosome, c'est-à-dire des paires de chromosomes.

GAMÈTE
Cellule reproductrice haploïde (ovule chez la femelle, spermatozoïde chez le mâle).

HAPLOÏDE (N)
Qui possède un seul exemplaire de chaque chromosome.

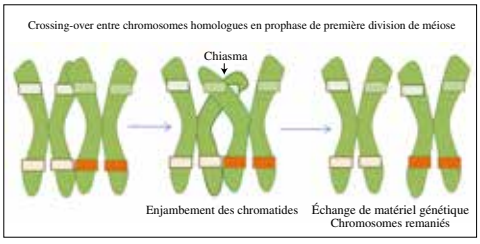
ZOOM SUR...

LE BRASSAGE INTERCHROMOSOMIQUE
Il correspond à la migration indépendante des différentes paires de chromosomes au cours de la première division de méiose. On peut le mettre en évidence en analysant les résultats de croisements étudiant des gènes portés par des paires de chromosomes différentes (gènes indépendants).

LE BRASSAGE INTRACHROMOSOMIQUE
Il augmente la diversité des gamètes en formant des chromatides recombinées par *crossing-over* en prophase de première division de méiose. Les gamètes de type recombiné possèdent une nouvelle combinaison d'allèles qu'aucun des parents ne présentait. On peut mettre en évidence ce brassage en analysant les résultats de croisements étudiant des gènes portés par une même paire de chromosomes (gènes liés).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

migrent chacun aléatoirement vers l'un des pôles de la cellule. Les chromosomes d'origine paternelle ou maternelle se répartissent au hasard, les paires étant indépendantes les unes des autres. C'est **le brassage interchromosomique**. En fin de **télophase I**, deux cellules haploïdes, ne portant plus qu'un seul chromosome de chaque paire, sont formées (4). **La seconde division** de méiose ressemble à une mitose : les deux chromatides sœurs de chaque chromosome sont séparées. Une cellule en méiose donnera donc quatre cellules différentes, contenant une copie de chaque gène, soit l'allèle d'origine paternelle, soit l'allèle d'origine maternelle (5).



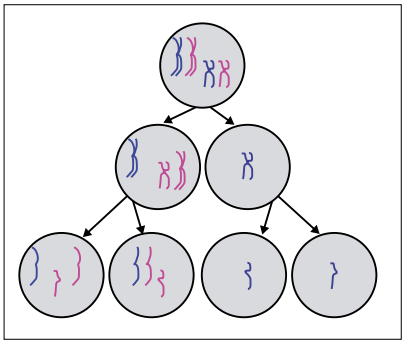
Le brassage intrachromosomique

Les chromosomes homologues sont si étroitement accolés lors de la prophase I que des échanges de matériel génétique peuvent se produire entre chromatides : c'est le **brassage intrachromosomique**. Au hasard, les chromatides chevauchantes se coupent, puis le bras coupé se ressoude avec l'autre chromatide. C'est **le *crossing-over***.
Ainsi, à partir d'une cellule mère de gamètes mâles, on obtient quatre spermatozoïdes génétiquement différents. Pour les gamètes femelles, les divisions sont inégales car seule une cellule garde tout le cytoplasme ; les autres dégénèrent. Si dans les gamètes mâles la méiose est achevée, pour les gamètes femelles, la méiose est arrêtée en cours de processus et s'achèvera après la fécondation (avant la fécondation on parle donc d'**ovocyte** et non d'**ovule**).

Le hasard de la fécondation

Les brassages au cours de la méiose permettent d'obtenir une grande diversité de gamètes contenant chacun **une combinaison unique et nouvelle d'allèles**. Chez chaque parent, un seul de ces gamètes sera impliqué dans la fécondation. Dans une fratrie humaine, la probabilité que deux individus non jumeaux vrais soient génétiquement identiques est quasiment nulle.
Dans l'espèce humaine, la migration indépendante des chromosomes (**brassage interchromosomique**) permet théoriquement la formation de 2^{23} types de gamètes différents et la rencontre au hasard avec un gamète de l'autre sexe conduit à chaque fécondation à $(2^{23})^2$, soit 70 000 milliards de combinaisons possibles pour **une cellule-œuf ou zygote**. Ce chiffre est très sous-évalué car il ne tient pas compte du brassage intrachromosomique dû aux *crossing-over*. Une quasi-infinité de combinaisons génétiques différentes sont en réalité possibles.
Toutefois, seule une fraction de ces zygotes est viable et peut poursuivre son développement. **Une anomalie chromosomique** peut par exemple empêcher le déroulement des divisions de l'embryon et conduire à un avortement spontané.

Les anomalies au cours de la méiose : sources de troubles mais aussi de diversification
Lors de la méiose, deux chromosomes (**méiose I**) ou deux chromatides (**méiose II**) peuvent migrer vers le même pôle de la cellule. Dans ce cas, certains gamètes porteront **un chromosome de moins**, et d'autres **un chromosome surnuméraire**. Ces gamètes peuvent être fécondants, mais le zygote ne possédera pas le nombre de chromosomes spécifique de son espèce : s'il est viable, l'individu sera porteur d'une anomalie chromosomique, comme **une monosomie** (45 chromosomes au lieu de 46) ou **une trisomie** (47 chromosomes).



Anomalie de répartition des chromosomes homologues en première division de méiose : la moitié des cellules filles aura un chromosome surnuméraire, l'autre moitié aura un chromosome en moins

Lors des *crossing-over*, des morceaux de chromatides peuvent être échangés de façon inégale : les gamètes qui résultent de ces divisions peuvent soit ne plus porter certains gènes (on parle de **délétion de gènes**), soit en avoir deux copies (on parle alors de **duplication de gènes**). Si la fécondation implique un gamète portant l'une de ces anomalies, l'embryon peut ne pas survivre ou présenter des malformations dues à cette anomalie génétique. Dans certains cas, la duplication de gènes a permis de créer des familles multigéniques, comme les gènes du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) ou les gènes codant pour les globines.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Bientôt des bébés à la carte ?** p. 10-11
(Chloé Hecketsweiler, *Le Monde* daté du 24.05.2018)

ZOOM SUR…

LES ANOMALIES CHROMOSOMIQUES

Des perturbations du déroulement de la méiose peuvent conduire à des anomalies chromosomiques dont quelques-unes peuvent être viables : trisomie 21, trisomie 18 (mortalité avant l'âge de 1 an) ou trisomie 13 (décès in utero ou avant 3 mois). Elles peuvent aussi toucher les chromosomes sexuels : trisomie XXY (syndrome de Klinefelter, homme stérile), trisomie XYY, trisomie XXX ou monosomie X (syndrome de Turner, femme stérile).

LES FAMILLES MULTIGÉNIQUES

• Certains ensembles de gènes se caractérisent par de grandes similitudes au niveau de leurs séquences. Ces gènes sont situés à des locus différents sur un même chromosome ou sur des chromosomes différents. Une ressemblance de plus de 20 % n'est pas le fait du hasard, mais d'une parenté. Ces gènes résulteraient de duplications à partir d'un gène ancestral. Ce mécanisme, associé à des mutations qui se produisent de manière indépendante sur les différents duplicatas, permettrait d'expliquer l'existence des familles multigéniques. La duplication d'un gène constitue une source de diversification car la protéine codée par gène peut acquérir de nouvelles fonctions par mutations du gène dupliqué, sans que le gène et la protéine d'origine ne soient affectés.
• L'exemple de la famille des globines chez l'homme.
L'hémoglobine est une protéine constituée de l'association de quatre chaînes polypeptidiques. Au cours de sa vie, l'organisme humain fabrique plusieurs types d'hémoglobines, constituées de chaînes de globines différentes : chaînes zêta, epsilon, alpha, bêta, gamma ou delta. Les six gènes codant pour ces globines sont situés sur des locus différents sur les chromosomes 16 et 11. La comparaison des séquences d'acides aminés des différentes globines permet de constater leur grande ressemblance.

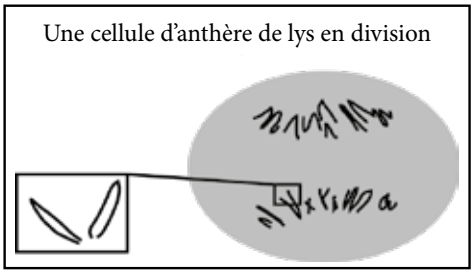
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 1 : La méiose

Le QCM

Cochez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.

1. Cette photographie représente une cellule à :



a) 2n = 24, en anaphase d'une mitose.
b) 2n = 24, en anaphase I d'une méiose.
c)2n = 12, en métaphase d'une mitose.
d) 2n = 12, en anaphase II d'une méiose.

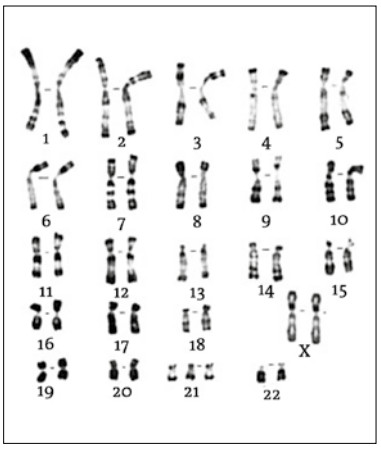
2. La mitose :
a) est source de diversité génétique.
b) donne naissance à 4 cellules à partir d'une cellule.
c) conserve toutes les caractéristiques du caryotype.
d) permet la production des gamètes.

3. La méiose produit :
a) 4 cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.
b) 2 cellules diploïdes à partir d'une cellule diploïde.
c) 4 cellules diploïdes à partir d'une cellule diploïde.
d) 2 cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde.

4. La réplication de l'ADN a lieu :
a) entre les deux divisions de la méiose.
b) uniquement avant une mitose.
c) uniquement avant une méiose.
d) avant la première division de la méiose

5. Lors d'une méiose se déroulant sans anomalie, il peut s'effectuer :
a) un brassage intrachromosomique entre chromosomes non homologues.
b) un brassage interchromosomique entre chromosomes homologues.
c) un brassage interchromosomique puis un brassage intrachromosomique.
d) un brassage intrachromosomique puis un brassage interchromosomique.

Le document suivant représente le caryotype d'un enfant atteint d'une anomalie chromosomique.



6. Le caryotype ci-dessous peut avoir pour origine :
a) une duplication du chromosome 21 lors de la méiose.
b) une non-disjonction de la paire chromosomique n° 21 lors de la division I de la méiose.
c) une non-disjonction de la paire chromosomique n° 21 lors de la division II de la méiose.
d) un accident génétique uniquement lors de la formation des gamètes femelles.

Le sujet de question de synthèse

La diversité du vivant a pour origine de nombreux mécanismes dont certains sont d'origine génétique.
En prenant comme exemple la transmission de deux gènes liés, montrez comment lors de la méiose il peut s'effectuer un brassage de l'information génétique.
Votre exposé sera accompagné de schémas.

Le corrigé

QCM : 1. b), 2. c), 3. a), 4. d), 5. d) 6. b)

L'analyse du sujet de question de synthèse

La précision « deux gènes liés » permet de limiter le sujet au brassage intrachromosomique. Il s'agit alors de trouver un génotype parental pertinent (hétérozygote) pour deux couples d'allèles portés par la même paire de chromosomes, puis de représenter les phases de la méiose appropriées, en insistant sur différents moments de la prophase I (*crossing-over*).

Proposition de corrigé

Introduction : La méiose est définie comme la division cellulaire permettant la production de gamètes haploïdes ne portant qu'un allèle pour chaque gène sur les deux que possède le parent.
Problématique générale : Comment expliquer que des parents ne puissent engendrer que des descendants génétiquement différents ?

NOTIONS CLÉS

CONVENTIONS D'ÉCRITURE EN GÉNÉTIQUE

En génétique, les différents allèles d'un gène sont désignés par une ou deux lettres.
L'allèle dominant est écrit en majuscule ou minuscule et porte le signe (+) en exposant ; l'allèle récessif est écrit en minuscules et ne porte pas de signe. Ex. : chez la drosophile, les ailes peuvent être vestigiales (allèle vg) ou normales (allèle vg^+). Le phénotype s'écrit entre crochets. Ex. : [vg^+] signifie que la drosophile porte des ailes normales. Le génotype s'écrit entre parenthèses. Les deux allèles que possède l'individu diploïde sont séparés par deux traits dont chacun représente l'un des chromosomes homologues. Ex. : le génotype d'une drosophile hétérozygote s'écrit (vg^+//vg).

CROISEMENT TEST, *TEST CROSS*

Croisement d'un individu présentant le phénotype dominant avec un homozygote récessif, c'est-à-dire porteur des allèles récessifs des gènes considérés. Le croisement test permet, par l'étude du phénotype des descendants, de mettre en lumière le génotype des gamètes du parent présentant le phénotype dominant.

DOMINANCE/RÉCESSIVITÉ/ CODOMINANCE

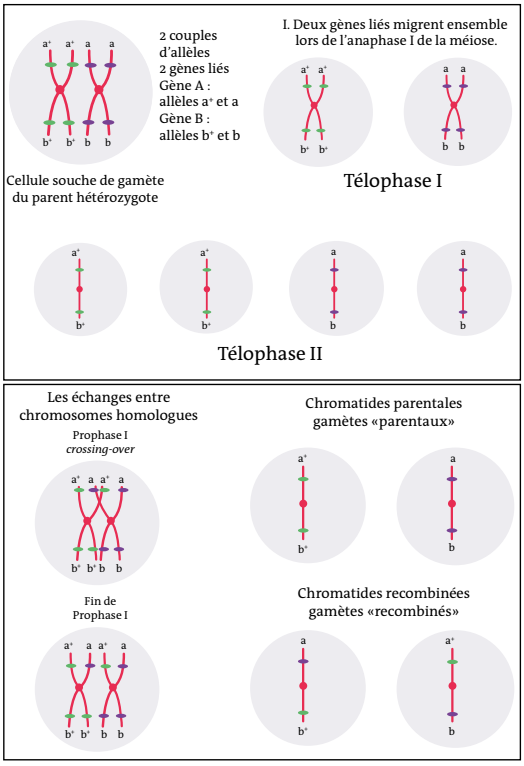
Lorsque les deux chromosomes homologues portent des allèles différents pour un même gène, celui qui s'exprime au niveau du phénotype est appelé « allèle dominant ». L'autre est récessif. Si les deux allèles s'expriment, comme dans l'exemple du groupe sanguin AB, ils sont dits « codominants ».

HOMOZYGOTE/ HÉTÉROZYGOTE

Un individu peut posséder deux allèles identiques pour un gène : il est alors homozygote pour ce gène. S'il possède deux allèles différents, il est hétérozygote.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Problématique limitée au sujet : Dans le cas de gènes liés, comment expliquer que des descendants puissent porter des associations d'allèles différentes de leurs parents ?
Point de départ : Une cellule souche de gamète d'un parent hétérozygote pour deux gènes portés par la même paire de chromosomes.
I. Deux gènes liés sont censés migrer ensemble lors de l'anaphase I de la méiose
Résultat : on peut former deux types de gamètes seulement concernant les deux gènes étudiés.
II. Les résultats expérimentaux révèlent des recombinaisons
Les analyses de croisements entre un hétérozygote et un double homozygote récessif effectués en laboratoire, chez la drosophile par exemple, montrent que les parents hétérozygotes produisent en réalité quatre types de gamètes, mais dans des proportions qui ne sont pas équivalentes : une majorité de gamètes « parentaux » et une minorité de gamètes « recombinés » qui portent des associations d'allèles qui n'existaient pas chez le parent.



III. Les échanges entre chromosomes homologues
Les recombinaisons ont lieu en prophase I de méiose, au moment de l'appariement des chromosomes homologues. Des *crossing-over* se forment et les chromosomes échangent des portions de chromatides : c'est le brassage intrachromosomique. Cependant, pour un couple de gènes donné, les recombinaisons homologues n'ont lieu que dans un certain pourcentage des méioses au moment de la formation des gamètes.
Conclusion : L'étude de croisements concernant un couple de gènes liés permet de mettre en évidence le brassage intrachromosomique, qui augmente la diversité possible des gamètes. Si l'on considère l'ensemble des chromosomes et des gènes d'un individu, la combinaison du brassage intrachromosomique et du brassage interchromosomique (migration indépendante des différentes paires de chromosomes en méiose I) permet de produire une infinité de gamètes différents. La fécondation réunira au hasard deux gamètes parmi de nombreuses possibilités.

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher plusieurs réponses par question dans le QCM : une seule est exacte.
- Confondre brassage interchromosomique (métaphase et anaphase I) et brassage intrachromosomique (prophase I).
- Négliger les schémas ou représenter des chromosomes trop petits.
- Se tromper en plaçant les allèles sur les chromosomes de la cellule parentale de départ.
- Omettre d'évoquer le brassage interchromosomique même si, en considérant uniquement deux gènes liés, ce brassage n'est pas visible.
- Traiter la fécondation alors que le sujet ne porte que sur la méiose.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1 : Synthèse sans documents
– Discutez des conséquences possibles des anomalies survenues lors de la méiose et de la fécondation. (schémas attendus)
Partie 2.1 : Rédigé (tableau à compléter)
– Ordonnez et annotez des clichés d'observation de différentes phases de la méiose.
Partie 2.1 : QCM avec document
– Étude d'un graphique représentant l'évolution de la quantité d'ADN au cours de la méiose et de la fécondation.

ZOOM SUR…

LA DROSOPHILE, ORGANISME MODÈLE EN GÉNÉTIQUE

La mouche drosophile est devenue un organisme modèle en génétique depuis le début du XX^{e} siècle. Elle présente notamment l'avantage de n'avoir qu'un petit nombre de chromosomes. Les résultats obtenus ont pu être extrapolés aux autres organismes. Ce sont notamment les travaux sur la drosophile qui ont permis de faire le lien entre les chromosomes et les caractères héréditaires.

DATES CLÉS

L'HISTOIRE DE LA GÉNÉTIQUE

- 1866 : Mendel, prêtre et botaniste, élabore les premières lois de la transmission des caractères héréditaires.
- 1879 : Fleming observe le comportement des chromosomes au cours de la mitose.
- 1888 : Strasburger observe le comportement des chromosomes au cours de la méiose.
- 1901 : De Vries introduit la notion de mutation.
- 1902 : Sutton et Boveri proposent que les chromosomes soient les porteurs de l'information génétique.
- 1906 : Johanssen introduit le terme « gène » pour désigner un facteur héréditaire.
- 1915 : Morgan apporte les preuves expérimentales de la théorie chromosomique de l'hérédité grâce à ses études sur les drosophiles.
- 1941 : Beadle et Tatum établissent qu'un gène est responsable de la synthèse d'une enzyme (protéine).
- 1944 : Avery, McLeod et McCarty découvrent que l'ADN est le support de l'information génétique chez la bactérie.
- 1953 : Watson et Crick élaborent le modèle de la structure en double hélice de l'ADN grâce aux travaux de Franklin.
- 1959 : Lejeune met en évidence l'anomalie chromosomique de la trisomie 21 (syndrome de Down).
- 1988 : lancement du projet Génome humain.
- 2003 : achèvement du séquençage complet du génome humain.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Bientôt des bébés à la carte ?

Profitant des progrès des technologies de séquençage de l'ADN, des start-up américaines proposent aux particuliers, à grand renfort de marketing, une gamme de tests évaluant le risque pour eux d'avoir un enfant malade.

A San Francisco, dans un ancien bâtiment industriel reconverti en temple de la génétique high-tech, les échantillons arrivent dans de simples enveloppes FedEx. Des techniciens en blouse blanche et gants bleus les déballent à la chaîne, leur travail est ponctué par le « bip » des lecteurs de code-barres. Une fois identifiés, les tubes sont alignés en rang dans de petits casiers multicolores et mis au frais dans de grandes armoires réfrigérées. Dans quelques jours, l'ADN extrait de ces quelques millilitres de sang ou de salive aura livré ses secrets. En 2017, environ 150 000 échantillons ont ainsi été expédiés chez Invitae, l'une des nombreuses start-up à surfer sur la vague des tests génétiques. Ce chiffre devrait presque doubler cette année, en raison de l'engouement des futurs parents conquis par la promesse d'un bébé parfait.

Estimées à 2 milliards de dollars (1,7 milliard d'euros) aux Etats-Unis, les ventes de tests génétiques prénataux devraient bondir de 10 % par an d'ici à 2021. Aux côtés d'Invitae, une dizaine de start-up (Natera, Counsyl et Verinata…) sont parties à la conquête de ce marché. A grand renfort de marketing, ces laboratoires commercialisent des tests destinés à évaluer le risque pour un couple en bonne santé de donner naissance à un enfant malade, ou à sélectionner les embryons lors d'une fécondation in vitro (FIV). Avec les progrès spectaculaires des technologies de séquençage, l'univers futuriste de Bienvenue à Gattaca – un film de 1997 qui met en scène des humains au génome irréprochable – ne semble plus si loin. Lire les 3 milliards de « lettres » (A, T, C, G) qui composent un génome humain coûte moins de 1 000 dollars, contre un million il y a dix ans. Quelques centaines de dollars suffisent pour une analyse ciblée de gènes.

« L'Amazon des tests génétiques »

Invitae, qui ambitionne de devenir *« l'Amazon des tests génétiques »*, a investi plusieurs millions de dollars dans une ferme de séquenceurs. Installées au rez-de-chaussée, ces machines aux allures de gros photocopieurs « lisent » une à une les lettres de l'ADN. Il leur faut environ deux jours pour décrypter un échantillon. *« Pour chaque test, nous nous intéressons qu'à un petit pourcentage du génome »*, précise Nathan McDonald, qui pilote les opérations. De l'autre côté d'une baie vitrée, une armée de bio-informaticiens donne du sens aux séquences obtenues.

De plus en plus courants, les tests de dépistage proposés aux parents ciblent les gènes récessifs, qui s'expriment seulement si deux copies défectueuses sont réunies chez un individu. *« Le problème de ces maladies récessives est que, dans la plupart des cas, vous n'avez pas d'histoire familiale. Une copie vient du côté de la mère, une autre du côté du père : il n'y a eu aucune occasion avant leur rencontre pour que la maladie s'exprime. Les couples se découvrent porteurs à la naissance d'un premier enfant malade »*, souligne Robert Nussbaum, le directeur médical d'Invitae. Jusqu'à présent, ces tests étaient pratiqués de façon ciblée dans certaines communautés, comme les juifs ashkénazes, les Caucasiens ou les Afro-Américains, où le risque de développer certaines maladies génétiques était plus élevé. *« Grâce au séquençage low cost, il est possible de passer en revue des centaines de gènes, en recherchant toutes les mutations, et pas seulement les plus courantes »*, ajoute ce généticien qui exerce à l'hôpital de l'université de San Francisco. Il existe 1 300 maladies héréditaires récessives et les scientifiques estiment qu'1 à 2 % des couples risquent de donner naissance à un enfant malade.

Ces tests de dépistage ne répondent cependant pas à toutes les questions. Selon le gène concerné, la mutation, et l'individu, la maladie peut s'exprimer très différemment… voir pas du tout. *« Si votre voiture est cassée, vous comptez sur le mécanicien pour vous dire ce qui ne va pas. De la même façon, les parents attendent du généticien une réponse objective, or c'est extrêmement difficile »*, admet M. Nussbaum. *« Notre rôle n'est pas de leur dire ce qu'ils doivent faire, c'est à eux de décider »*, poursuit-il. En cas de risque avéré ou de doute (dans le cas d'une maladie récessive, le risque de donner naissance à un enfant malade est de 25 %), une fécondation in vitro (FIV) peut-être proposée au couple, avec l'objectif de sélectionner génétiquement les embryons indemnes avant leur implantation. Cette technologie ne fait toutefois pas de miracles : le taux d'échec des FIV reste élevé, et le risque de maladie ne peut pas être totalement écarté, une majorité des mutations n'étant pas héritées mais apparaît aléatoirement.

Ces limites n'empêchent pas certaines start-up de penser au coup d'après. Dès cette année, de nouveaux critères de sélection pourraient apparaître. Des scientifiques estiment possible de prédire des maladies ou des caractéristiques (intelligence, personnalité) déterminées par plusieurs gènes. La prédiction prend la forme d'un « score ». Bien que sa valeur soit très incertaine, Genomic Prediction, une start-up du New Jersey a annoncé la commercialisation de tests préimplantatoires fondés sur ces « scores ».

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

POURQUOI CET ARTICLE ?

En Californie, des start-up proposent à des futurs parents des tests génétiques prénataux permettant d'évaluer le risque que leurs enfants à naître développent une maladie génétique. Cette prédiction est maintenant peu onéreuse à réaliser. Elle est rendue possible par le séquençage automatisé de l'ADN des parents, dont les très longues séquences obtenues sont traitées par informatique. **Cet article interroge les conséquences éthiques de ces prédictions.** Pour l'instant, elles peuvent être utilisées pour éviter dans une certaine mesure les maladies génétiques. Mais elles pourraient ouvrir la voie à une sélection des embryons fondée sur une soi-disant estimation d'aptitudes comme l'intelligence, les dons artistiques… Il est urgent d'interroger le cadre réglementaire que nous souhaitons pour ces pratiques rendues possibles par les avancées technologiques et scientifiques.

« Nous n'allons pas créer des Xmen »

En l'absence de tout cadre réglementaire, certains s'inquiètent des possibles dérives. *« Presque partout, tout le monde comprend qu'on utilise ces tests pour éviter une pathologie grave. Mais quid des formes plus légères ? »*, s'interroge Hank Greely, professeur de bio-éthique à l'université de Stanford. Posée sur son bureau, son dernier livre, intitulé *The End of Sex and the Future of Human Reproduction* (Harvard University Press, 2016, non traduit), explore l'abîme des questions éthiques soulevées par les progrès de la génétique. *« Qu'est-ce que cela signifie pour les personnes atteintes d'une maladie génétique ? D'une certaine façon, le message de la société est «tu n'aurais pas dû naître» »*, poursuit-il, tout en insistant sur le fait que la sélection des embryons « épargnera de la souffrance ».

Epinglées à son étagère, des affiches de super-héros semblent se moquer des scientifiques et des entrepreneurs qui promettent déjà aux parents des « super-bébés ». *« Nous n'allons pas créer des Xmen, car nous ne savons pas comment créer des super-pouvoirs »*, martèle-t-il. *« Le don pour la musique, le sport ou les maths a un lien avec la génétique, mais c'est très compliqué »*. On pourra peut-être dire : *« Cet embryon a 12 % de chance d'être dans les 10 % les plus intelligents. Mais cela signifie surtout qu'il a 88 % de chance de ne pas y être. Les parents l'entendront-ils ? »*, questionne-t-il en citant un article controversé sur l'intelligence publié en janvier par le psychologue américain, Robert Plomin. Le chercheur y affirme qu'il sera possible de prédire l'intelligence d'un individu non pas en regardant quelques gènes, mais en analysant les milliers de variations dans son ADN. On est loin d'une science exacte : à ce stade, le « score » obtenu n'explique que 10 % du « QI ». Cette approche pourrait être utilisée pour évaluer d'autres aptitudes : à la musique, au sport… Le bébé à la carte n'est pas pour aujourd'hui, mais demain ?

Chloé Hecketsweiler, *Le Monde* daté du 24.05.2018

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Diversification génétique et diversification des êtres vivants

Les mutations et la rencontre au hasard de deux gamètes génétiquement uniques ne suffisent pas à expliquer la totalité de la diversification des êtres vivants. Celle-ci s'est réalisée au cours du temps, depuis les premières formes de vie, il y a quatre milliards d'années. Les mécanismes mis en jeu sont variés et ne sont pas toujours liés à une diversification génétique.

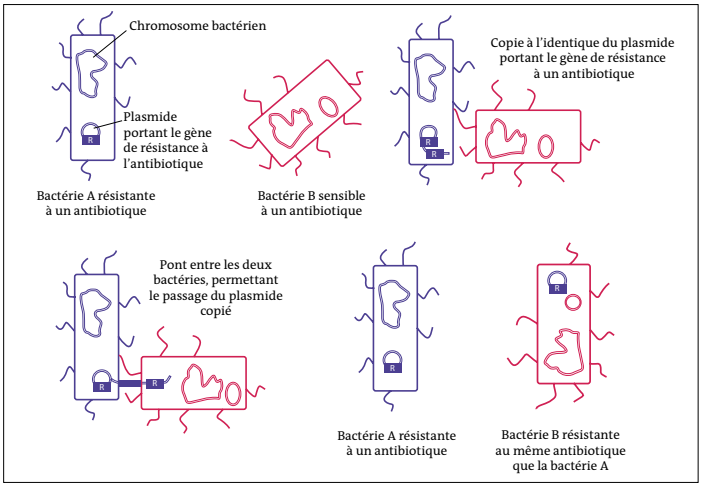
Le transfert horizontal de gènes

Le transfert vertical qualifie la transmission de matériel génétique d'une génération à une autre. Des transferts horizontaux sont possibles entre des bactéries qui ne descendent pas les unes des autres, qu'elles appartiennent ou non à la même espèce. Par exemple, des **gènes de résistance aux antibiotiques** sont portés par des plasmides, courtes molécules d'ADN circulaires. Deux bactéries peuvent s'échanger directement du matériel génétique plasmidique grâce à des **ponts cytoplasmiques**. Une bactérie acquiert alors la résistance à certains antibiotiques à partir d'une autre bactérie. Il s'agit d'un mécanisme de diversification rapide. L'usage excessif de traitements antibiotiques a favorisé le développement de populations bactériennes de plus en plus résistantes.

Hybridation et polyploïdisation

Deux espèces végétales voisines peuvent être **interfécondes**. Leur croisement, naturel ou artificiel, peut donner des hybrides présentant des critères variés, susceptibles d'intéresser les agriculteurs : productivité, goût, résistance au froid, à un insecte… Parmi les plants issus des graines obtenues à partir de ces croisements seront sélectionnés ceux qui expriment les caractères les plus intéressants pour l'agriculture. Les céréales destinées à la consommation, comme le blé ou le maïs, sont issues d'une **succession de croisements**. Dans le cas de ces végétaux, il y a eu augmentation du nombre de chromosomes : on parle de **polyploïdisation**. Ce phénomène est fréquent chez les végétaux, mais beaucoup plus rare chez les animaux. Il peut notamment résulter d'une absence de réduction du nombre de chromosomes lors de la formation des gamètes ou d'un doublement des chromosomes suite à une erreur dans une mitose ou une méiose.

L'engrain sauvage et l'égilope faux épeautre sont **diploïdes** (ils ont 7 paires de chromosomes) et ont été croisés. Cela a d'abord donné un hybride stérile qui a pu ensuite subir une polyploïdisation et donner une plante tétraploïde (2 × 7 paires, soit 28 chromosomes), qui a été elle-même croisée avec un plant diploïde. Cela a donné, après hybridation suivie de polyploïdisation, deux sortes de céréales à 42 chromosomes (3 × 7 paires). La **domestication** a eu plusieurs effets,



Transfert d'un plasmide portant un gène de résistance à un antibiotique, d'une bactérie résistante à une bactérie non résistante (conjugaison)

MOTS CLÉS

CELLULES GERMINALES
Cellules à l'origine des gamètes. Leur patrimoine génétique est transmissible à la descendance de l'individu.

CELLULES SOMATIQUES
Toutes les cellules d'un organisme à l'exception des cellules germinales.

HYBRIDATION
Croisement de deux individus appartenant à deux espèces différentes ou deux variétés différentes d'une même espèce.

PLASMIDE
Chez les procaryotes, un plasmide est une molécule d'ADN surnuméraire généralement circulaire pouvant être transférée à d'autres bactéries.

PLOÏDIE
Nombre de lots de chromosomes que possède une cellule.

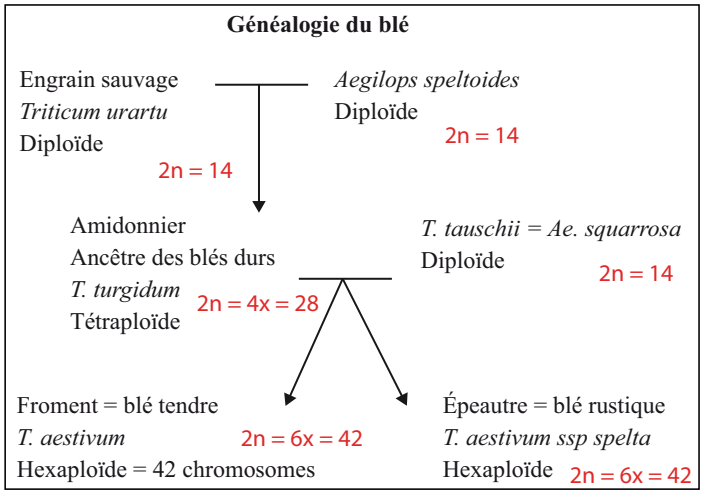
POLYPLOÏDE
Se dit d'un organisme qui possède plus de deux exemplaires de chacun de ses chromosomes.

NOTIONS CLÉS

LES GÈNES HOMÉOTIQUES
Les gènes homéotiques, ou architectes, sont impliqués dans l'identité cellulaire le long de l'axe antéropostérieur lors du développement embryonnaire. L'expression de chacun d'entre eux est restreinte à un groupe de cellules délimité dans l'espace, ce qui détermine le plan d'organisation. Répartis sur quatre chromosomes chez les vertébrés et un seul chromosome chez les insectes, ils forment une famille multigénique. Les séquences de ces gènes sont si ressemblantes entre les différentes espèces qu'il peut être possible, par manipulation génétique, de remplacer un gène homéotique d'insecte par son homologue de vertébré, sans conséquence sur le phénotype.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

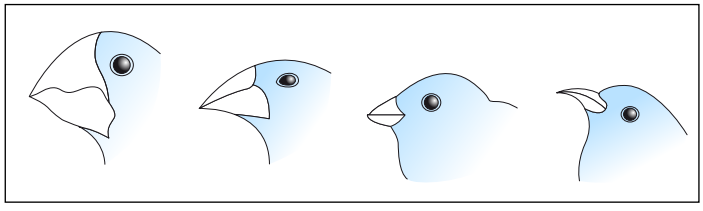
telle l'augmentation de la taille de l'épi mais également du nombre de grains par épi. La productivité a donc été améliorée.



L'infection par un virus

Près de 10 % du génome des mammifères proviennent de virus. Ils sont des **parasites intracellulaires** : leur génome s'insère dans celui des cellules infectées. Cet ajout de matériel génétique peut être défavorable, mais aussi procurer un avantage transmissible à la descendance s'il s'agit de cellules germinales.

Des variations dans l'expression de certains gènes



Géospizes (10 à 20 cm) de gauche à droite : fuligineux – à bec pointu – modeste – des mangroves

Charles Darwin au XIX[e] siècle, les Grant au XX[e] siècle ont étudié les pinsons des Galápagos. On a découvert plus récemment que la forme de leur bec était liée à l'expression de certains gènes, dont le gène BMP4 (*bone morphogenetic protein*) : plus intensément et plus tôt ce gène est exprimé au cours du développement embryonnaire, plus le bec de ces oiseaux devient robuste, ce qui a des conséquences sur leur alimentation. La protéine BMP4 est le produit de l'expression de ce gène, elle agit sur la **différenciation des cellules** lors du développement embryonnaire.

Si un **gène homéotique** s'exprime à un endroit inapproprié, les conséquences sont visibles sur le plan d'organisation. Chez les serpents, le gène Hox6, responsable de la formation de côtes, s'exprime tout le long de l'axe antéropostérieur, contrairement à ce qui se passe chez les autres vertébrés. Ceci explique la présence de côtes sur toutes les vertèbres des serpents.

Les variations de la localisation, de la chronologie et de l'intensité de l'expression des gènes homéotiques sont une source importante de diversification des êtres vivants.

Des associations entre espèces différentes

Une **diversification des êtres vivants** est possible sans modification de leur génome, par l'association d'espèces différentes. Dans le cas des symbioses, les deux individus tirent un avantage à s'associer : échanges de substances nutritives, protection, hébergement, défense... sont des exemples de bénéfices réciproques.

La transmission de comportements nouveaux

Chez les oiseaux, le chant est indispensable au choix des mâles par les femelles pour la reproduction. Il s'agit d'un comportement transmis par les parents aux jeunes par apprentissage.

Chez les chimpanzés, le choix et l'utilisation de cailloux pour casser des noix sont transmis des adultes aux jeunes de certaines communautés seulement, durant un apprentissage de cinq années.

Les comportements nouveaux sont transmis de génération en génération par **voie non génétique**.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **L'homme n'a pas le monopole de la culture** p. 16-17
(Nathaniel Herzberg, *Le Monde* daté du 20.03.2019)

NOTIONS CLÉS

EMPREINTE

Chimpanzés

Processus d'apprentissage mis en jeu au cours du développement des jeunes, et entraînant une modification durable du comportement, qui peut être héritable mais de manière non génétique.

SYMBIOSE

Association à bénéfices réciproques entre deux organismes appartenant à des espèces différentes.

Exemples de symbioses :

– les lichens sont constitués d'une association entre une algue unicellulaire et un champignon : l'algue fournit les produits de la photosynthèse, tandis que le champignon permet la survie dans un milieu sec ;

– certaines colonies de fourmis sont en symbiose avec des arbres tel le cécropia, elles y sont hébergées et nourries tout en participant activement aux défenses de l'arbre contre les herbivores ;

– les mycorhizes sont une association entre les racines des végétaux et des champignons ;

– les nodosités des fabacées, comme le haricot, associent les racines de ces plantes à des bactéries du genre *Rhizobium* : la plante fournit les produits de la photosynthèse, tandis que les bactéries apportent les produits azotés issus de la fixation de l'azote atmosphérique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.2 : L'origine virale du placenta

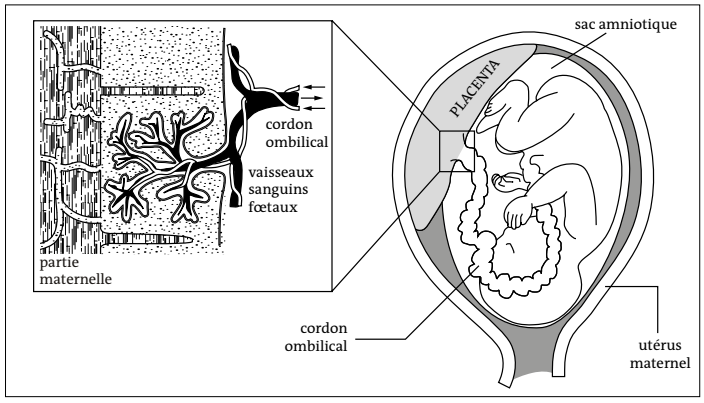
L'intitulé complet du sujet

Chez les mammifères, le placenta constitue une zone d'échanges entre le sang maternel et le sang fœtal, nécessaire au développement du fœtus. En 2009, des chercheurs ont émis l'hypothèse d'une origine virale de certains gènes indispensables à la mise en place du placenta. Proposez les différentes étapes du scénario ayant pu mener à l'apparition du placenta chez un ancêtre des mammifères actuels afin de montrer comment les virus peuvent jouer un rôle majeur dans la diversification du vivant.

Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document de référence

Le placenta, une zone d'échanges entre le sang de la mère et le sang de l'enfant qui nécessite la fusion des cellules



Les documents

Document 1 : Un virus à l'origine du placenta ?

L'apparition des mammifères placentaires, dont l'embryon est alimenté et protégé grâce à un placenta, il y a près de 100 millions d'années, serait-elle liée à une contamination virale ? C'est l'hypothèse que font des chercheurs après avoir découvert que le gène syncytine A, d'origine virale, est essentiel au développement du placenta chez la souris. En effet, les syncytines sont des protéines de surface permettant aux cellules qui les portent de fusionner entre elles, comme le fait un virus pour entrer dans une cellule. Ces fusions permettent la fabrication d'une « nappe cellulaire » multinucléée*, constituant essentiel du placenta, formée par la réunion de cellules individuelles en des « syncytia ». Pour les chercheurs, qui ont publié leurs travaux en juin 2009, une contamination virale pourrait donc avoir été un événement fondateur dans le passage d'un développement embryonnaire externe, chez les animaux qui pondent des œufs, à un mode « interne ».

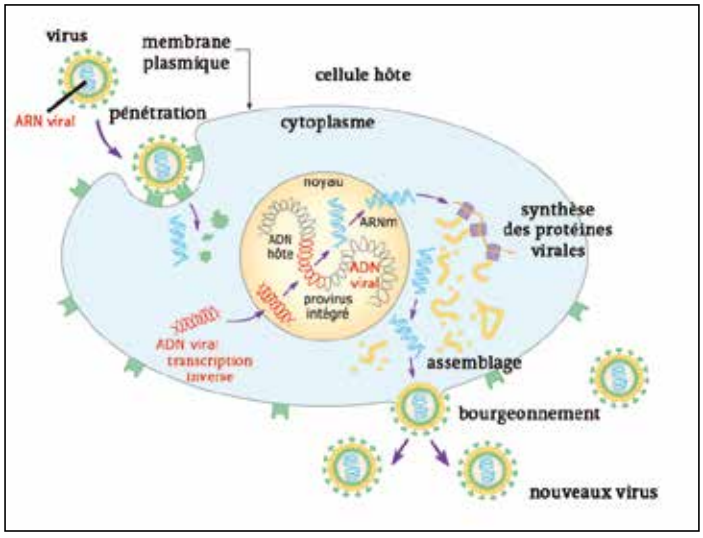
*Multinucléée : qui comporte de nombreux noyaux.

Source : d'après le journal du CNRS, n° 236, septembre 2009

Document 2 : Le cycle de réplication d'un rétrovirus

Un **rétrovirus** est un virus dont le génome est constitué d'ARN. Sa particularité est de posséder une enzyme qui permet la « transcription inverse » de l'ARN viral du génome en molécule d'ADN « complémentaire » capable de s'intégrer à l'ADN de la cellule-hôte. Il utilise ensuite la machinerie cellulaire pour se répliquer.

Document 3 : Des rétrovirus endogènes



ZOOM SUR…

LE CYCLE DE RÉPLICATION D'UN RÉTROVIRUS

Un rétrovirus est constitué d'ARN dans une enveloppe protéique. Il peut infecter les cellules qui présentent à leur surface des protéines auxquelles il peut s'amarrer : ce sont ses cellules-cibles. Le virus peut alors y transférer son matériel génétique en fusionnant avec la membrane cellulaire. L'ARN viral est converti en ADN par rétrotranscription grâce à une enzyme virale : la transcriptase inverse. L'ADN viral s'intègre au génome de la cellule-hôte et s'exprime. Ainsi, ARN viraux et protéines virales sont produits, permettant l'assemblage de nouvelles particules virales qui vont être disséminées.

DES VIRUS… PARTOUT !

L'étude des milieux naturels à partir des génomes qui s'y trouvent, la métagénomique, permet désormais le comptage et l'identification des virus de l'atmosphère, malgré leur petite taille, inférieure au micromètre. Résultat : dans un mètre cube d'air, on trouve entre 1,7 et 40 millions de virus selon les saisons. Pour les bactéries, la fourchette est plus basse : entre 860 000 et 11 millions d'individus par mètre cube. Au repos, un adulte pompe en moyenne 10 litres d'air par minute. À chaque minute qui passe, entre 17 000 et 400 000 virus pénètrent ainsi dans nos poumons… De quoi pousser un hypocondriaque à cesser de respirer ! L'atmosphère est un réservoir de virus encore largement inexploré auquel il serait temps de s'intéresser, notamment pour identifier des entités susceptibles de s'attaquer aux cultures… et aux hommes.

Source : d'après Pierre Barthélémy, *Combien de virus inhalez-vous chaque minute ?* sur le blog Passeur de sciences, le 10 octobre 2012

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les rétrovirus infectieux possèdent la propriété remarquable de s'intégrer dans l'ADN de nos chromosomes. En général, les cellules infectées sont des cellules somatiques qui ne sont pas impliquées dans la transmission de notre patrimoine génétique. Cependant, lorsqu'un rétrovirus parvient à infecter une cellule de la lignée germinale*, le rétrovirus intégré peut se transmettre à la descendance comme n'importe quel gène : il devient alors un « rétrovirus endogène ». Le génome de tous les vertébrés est ainsi envahi par de telles structures, et le séquençage systématique d'un grand nombre de génomes, dont ceux de l'homme et de la souris, montre que les rétrovirus endogènes représentent près de 8 % du matériel génétique de ces espèces.
Fort heureusement, la plupart des rétrovirus endogènes sont inactifs. Quelques rares éléments sont cependant toujours capables de produire des protéines d'origine rétrovirale.

*Cellule de la lignée germinale : cellule à l'origine de gamètes.
Extrait d'une publication du CNRS 2009

Source : www.cnrs.fr/insb/recherche/parutions/articles09/t-heidmann.htm

Analyse du sujet

Il s'agit de reconstituer une étape de l'histoire du génome des mammifères, dans laquelle les rétrovirus infectieux semblent avoir joué un rôle majeur. L'apparition, par des mécanismes qui auront été déduits des documents, d'une structure nouvelle comme le placenta est un exemple de diversification génétique du vivant.
Pour le baccalauréat, il n'est pas attendu de connaître tous les mécanismes de diversification de manière détaillée. Ils sont à étudier en relation avec leurs conséquences sur la diversification des êtres vivants. Les objectifs prioritaires sont la pratique du raisonnement scientifique et l'argumentation à partir de documents.

Le corrigé

Le scénario ayant mené à l'apparition du placenta chez un ancêtre des mammifères actuels :

Exploitation des documents 2 et 3

– Infection par un rétrovirus d'une cellule germinale d'un ancêtre des mammifères, par fusion avec sa membrane.
– Intégration de l'ADN viral, issu de la « transcription inverse » de l'ARN viral, dans le génome de la cellule germinale.
– Transmission à la descendance via les gamètes porteurs des gènes viraux.
– Certains gènes viraux restent actifs chez les descendants et s'expriment par la production de protéines virales.

Exploitation du document 1

– Certaines protéines virales de surface, les syncytines, exprimées par les cellules des descendants, permettent leur fusion pour former des syncytia.
– Les gènes viraux codant pour ces protéines de fusion cellulaire s'expriment au moment du développement embryonnaire et permettent la mise en place d'une zone d'échange entre le sang de la mère et le sang du fœtus : le placenta.

Les virus joueraient un rôle majeur dans la diversification du vivant

Le séquençage des génomes de vertébrés montre que les gènes issus de rétrovirus représentent près de 8 % du matériel génétique.
Dans l'exemple des syncytines, l'intégration et l'expression de gènes viraux a permis l'apparition du placenta.
Cette structure nouvelle a permis de passer d'un développement dans des œufs à un développement interne.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1 :
– Exploiter des documents pour établir le lien entre des variations de l'expression de gènes homéotiques et un exemple de diversification du vivant.
– Exploiter des documents sur l'évolution du génome des espèces cultivées.
Partie 2.2 :
– Exploiter des documents pour montrer que certains exemples de diversification du vivant se réalisent sans modification du génome.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Recopier à l'identique des phrases issues des documents.
• Utiliser systématiquement les documents dans l'ordre du sujet.
• Étudier les documents de manière exhaustive sans les mettre en relation.

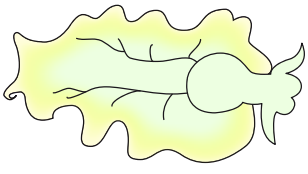
ZOOM SUR…

L'ENDOSYMBIOSE

L'endosymbiose est une coopération à bénéfices mutuels entre deux organismes, l'un étant contenu dans l'autre. Les cellules eucaryotes possèdent des mitochondries, des organites cellulaires spécialisés dans la production d'énergie qui contiennent de l'ADN. Une comparaison génétique a permis de montrer de grandes similitudes entre le génome des mitochondries et celui des bactéries de type Rickettsia, ce qui suggère une origine endosymbiotique de ces organites cellulaires. Toutefois le génome mitochondrial a perdu certains gènes, qui sont inclus dans le génome du noyau de la cellule eucaryote.

UNE LIMACE MARINE CHLOROPHYLLIENNE

La limace marine *Elysia chlorotica* est marron à sa naissance et broute des algues. Elle devient alors verte. À la lumière du soleil, la limace déploie des expansions de son corps – des parapodes – pour capter la lumière. Élevée à l'obscurité, elle se replie, redevient marron et doit brouter des algues. À la lumière, elle n'a pas besoin de manger car l'animal agit comme un végétal chlorophyllien, produisant les molécules dont elle a besoin grâce à la photosynthèse. Des chloroplastes ont été extraits des premières algues mangées. Ils sont conservés dans les cellules de la paroi intestinale mais ne sont pas transmis à la descendance. Des gènes nécessaires à la photosynthèse se trouvent dans le génome de la limace. Ils ont dû être acquis au cours de l'évolution par transfert horizontal entre les algues et une ancêtre de cette limace. Ce transfert a permis la mise en place de cette endosymbiose particulière.



Elysia chlorotica (2 à 3 cm)

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'homme n'a pas le monopole de la culture

La culture n'est pas le propre de l'homme. Singes, baleines, oiseaux… Les scientifiques accumulent les exemples de comportements locaux, acquis socialement, indépendamment des contraintes génétiques ou environnementales. Dernières admises au club : les mouches.

Ils sont philosophe, poète, romancier, anthropologue ou même comédien. Ils s'appellent Emmanuel Kant, Aimé Césaire, André Malraux, Claude Lévi-Strauss, Groucho Marx. Des hommes de « culture », assurément, au point d'avoir chacun proposé de cette fameuse notion au moins une définition. Rien de commun entre elles. Ou plutôt si : toutes sont centrées sur l'humain. Comme le sont, sans exception, les citations puisées dans les meilleurs ouvrages. Peinture, musique, symboles, langage, ou encore goûts, valeurs et principes moraux y tiennent les premiers rôles. *« C'est normal. On a défini la culture pour que ça colle avec l'humain, et seulement avec l'humain, car nous sommes convaincus de détenir une place unique dans le monde, supérieure à tous les autres, et n'avons cessé, depuis Descartes, de chercher tout ce qui nous distingue des autres animaux. C'est évidemment absurde et scientifiquement sans intérêt. On peut chercher ce qui caractérise une voiture. Mais comme scientifique, ce qui doit nous intéresser, c'est la roue. Et la roue de la culture, elle dépasse de très loin notre espèce. »*

L'homme qui livre cette déclaration de principe est effectivement scientifique, plus précisément biologiste, directeur de recherche au CNRS (université Paul-Sabatier, Toulouse). Après une vie passée à observer les animaux, à réaliser des expériences, à réfléchir sur l'évolution et à proposer des théories volontiers iconoclastes, Etienne Danchin s'apprête à prendre sa retraite.

Juste avant cela, il vient de lancer une dernière grenade dans la revue *Science*. Un article particulièrement détonant. Il y a apporté la preuve que les mouches drosophiles disposent des capacités cognitives pour se transmettre culturellement des comportements. Vous avez bien lu : les mouches drosophiles, stars des laboratoires de biologie, plus réputées toutefois pour leur simplicité génétique que pour leur puissance cérébrale. Au terme de deux années d'expériences, il a en effet montré que les minuscules insectes qui pullulent sur nos fruits ou dans nos vieilles bouteilles de vinaigre pouvaient acquérir une préférence sexuelle par apprentissage social, autrement dit par observation d'un congénère, et que cette préférence pouvait se transmettre de génération en génération. *« Cela a dû en étonner plus d'un,* sourit le primatologue Andrew Whiten, de l'université de St Andrews, en Ecosse. *Un si modeste insecte. Mais il fallait s'y attendre. Le "culture club", autrefois réservé aux humains, ne cesse de grandir. »*

L'histoire de cette lente conquête n'a pas commencé en Europe. Sur le continent des Lumières et de l'humanisme, l'étude des animaux avait gagné son autonomie en érigeant un interdit majeur : l'anthropomorphisme. Pas plus que l'émotion ou l'intelligence, la culture ne pouvait donc trouver place dans le vocabulaire et la pensée des éthologues occidentaux. Rien de tel en Orient, où la relation entre l'homme et l'animal s'appuie sur d'autres principes. Question de religion, sans doute ; probablement aussi de siècles de cohabitation avec nos plus proches cousins, les singes.

Et c'est au Japon, dans l'îlot de Koshima, en septembre 1953, qu'intervient un événement fondateur. Depuis quelques années, des scientifiques y étudient un groupe de macaques qu'ils approchent en leur offrant des patates douces. Ce jour-là, une jeune femelle de 18 mois se saisit d'un morceau de tubercule. Mais au lieu de l'engloutir, elle gagne la rivière voisine où elle le trempe avant de croquer dedans. Imo perfectionnera sa technique avec les années. D'abord, en nettoyant la terre consciencieusement, puis en profitant de la force du courant, enfin, en réalisant l'opération dans la mer voisine. Surtout, elle fait des émules. Trois mois plus tard, sa mère et deux autres jeunettes reproduisent ce comportement. Puis d'autres jeunes et d'autres mères. En cinq ans, les trois quarts des juvéniles et des jeunes adultes étaient convertis. Les mâles de plus de 4 ans, en revanche, rejetèrent la nouveauté.

En 1965, le primatologue Masao Kawai détaille cette observation dans la revue *Primates*. Il y décrit le génie d'Imo. La jeune guenon s'est en effet trouvée confrontée à un autre problème : séparer les grains de blé, également offerts aux singes, du sable de la plage avec lequel ils se mélangent. Là encore, elle a gagné la mer pour s'apercevoir que les uns flottent quand les autres tombent au fond… Au-delà de l'exploit individuel, c'est au groupe que s'est intéressé Kawai. Son article parle de *« comportements préculturels nouvellement acquis »*, le préfixe ne trompe personne. Une longue bataille commence.

Philosophes, anthropologues, psychologues mais aussi toute l'école occidentale d'éthologie, héritière de Konrad Lorenz et Nico Tinbergen, rejettent ces conclusions. L'école japonaise trouve en revanche le soutien d'une nouvelle génération de primatologues qui occupe peu à peu le terrain, au sens propre. Elles se nomment Jane Goodall, Dian Fossey ou Shirley Strum, s'immergent au milieu des grands singes et voient comme une évidence la transmission sociale de certains comportements. Car c'est bien de cela qu'il s'agit. La nouvelle définition de la culture que propose cette avant-garde est celle de comportements stables acquis non pas génétiquement ou par des contraintes environnementales mais par l'apprentissage social. Pour les mettre en évidence, l'objectif consiste désormais à traquer au sein d'une même espèce des sous-groupes affichant des traditions distinctes. Chaque primatologue y va de ses observations. Et en 1999, Andrew Whiten publie dans *Nature* une synthèse sobrement titrée « Les cultures chez les chimpanzés ». En deux pages, un tableau et une figure qu'il a soigneusement confectionnée, le scientifique, peintre à ses heures perdues, résume 151 années d'observation totale conduites sur 7 sites africains différents. Il n'en retient pas moins de 39 comportements spécifiques à certains groupes de chimpanzés, de l'hygiène individuelle au toilettage des congénères, des rituels sociaux ou de séduction à l'alimentation et à l'usage d'outils.

Apprentissage socialement motivé

Le plus emblématique de ces comportements reste la casse des noix. L'Allemand Christoph Boesch a documenté avec précision la façon dont les chimpanzés du parc national de Taï, en Côte d'Ivoire, utilisent de lourdes pierres pour briser l'épaisse gangue du fruit du *Panda oleosa*. Non seulement ils maîtrisent ce qu'il faut bien appeler des outils – une compétence longtemps considérée comme exclusivement humaine –, mais ils les conservent, les transportent, coopèrent pour partager le travail. Une activité que les plus jeunes apprennent de leurs mères, pendant plusieurs années, avant de devenir autonomes, souligne le primatologue du Max Planck Institute. Ils observent, copient, échouent d'abord, s'abîment les doigts, recommencent. *« Un apprentissage socialement motivé,* conclut Frans de Waal, dans son ouvrage *Quand les singes prennent le thé* (Fayard, 2001). *Au début il y a la mère, le désir d'agir comme elle. En cours de route, presque par accident, apparaît un second objectif, se nourrir d'un mets agréable. »*

Cette activité, tous les chimpanzés ne la pratiquent pas. Au nord-ouest de la forêt du Taï, sur le site de Bossou, en Guinée, les singes s'y adonnent également, cette fois avec les noix du palmier à huile. Idem au Liberia et en Sierra Leone, toujours à l'ouest, avec les fruits du coula. Mais à l'est, le fleuve Sassandra semble faire figure de frontière culturelle. Sur l'autre rive,

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

les mêmes arbres, les mêmes pierres, mais aucun cassage de noix observé. Pas davantage, du reste, sur les sites étudiés au Gabon, en Ouganda, au Rwanda, en Tanzanie…

Six ans plus tard, Andrew Whiten enfonce le clou, au laboratoire, cette fois. Pour s'assurer du caractère social de l'apprentissage, il conçoit une boîte offrant deux méthodes distinctes d'accès à la nourriture, qu'il enseigne chacune à une chimpanzé de haut rang. Puis les femelles sont replacées dans leur groupe d'origine. Rapidement, chaque communauté apprend le savoir-faire de sa dominante. Quelques rares individus découvrent bien la technique alternative. Mais ils rentrent vite dans la norme. Le chercheur présente enfin le dispositif à un troisième groupe, dépourvu de modèle. Les singes y resteront comme des poules devant un couteau.

Après les chimpanzés, 24 comportements culturels sont relevés chez les orangs-outangs dans les années 2000. Puis dans la décennie suivante, vient le tour des gorilles. *« Ça a été plus difficile à établir, car le gorille privilégie la force sur le maniement d'outils,* indique Shelly Masi, du Muséum national histoire naturelle, qui étudie le colosse des forêts depuis de nombreuses années. *Face à une termitière, un chimpanzé cherche une baguette pour la percer, un gorille la casse. Mais nous avons pu observer des différences de rituels sociaux ou de techniques pour grimper aux arbres, par exemple… »*

Les grands singes, donc. Mais aussi les mammifères marins. L'Américaine Jennifer Allen a ainsi analysé les techniques de pêche des baleines à bosse dans le golfe du Maine (Etats-Unis). Leur méthode traditionnelle est connue : créer, en soufflant, un filet de bulles avant d'avaler les poissons ainsi emprisonnés. Sauf que, en 1980, une innovatrice est vue frappant violemment de sa queue la surface avant de plonger pour produire ses bulles. Une façon d'éviter une fuite par le haut ? Toujours est-il que la pratique s'est répandue et que, vingt-sept ans plus tard, 40 % des cétacés de la région employaient cette technique. Nulle part ailleurs cette pratique n'a été observée.

Révolution culturelle chez les baleines

L'écologue de l'université du Queensland (Australie) ne s'est pas arrêtée là. Elle s'est penchée sur le chant des baleines, cette fois au nord de son île. Un sujet particulièrement symbolique, tant la langue constitue tout à la fois une particularité humaine et le véhicule principal de nos cultures. Au terme de treize années de suivi d'un groupe de cétacés, Jennifer Allen constate une complexification progressive des séquences. Une évolution régulière soudainement interrompue au contact d'un autre groupe, venu de l'ouest. Les baleines intègrent alors un peu du vocabulaire de leurs cousines mais simplifient les thèmes et structures. Ce phénomène, la biologiste marine lui a donné un nom : « révolution culturelle ».

Mais est-ce bien de culture que l'on parle ? Retraité de l'université McMaster, au Canada, le professeur Bennett Galef s'est toujours montré dubitatif face à des conclusions qu'il juge « hâtives ». Il n'écarte pas l'existence, chez les animaux, d'un apprentissage social, au contact des congénères. *« Par renforcement local* [essais et erreurs] *ou par émulation,* précise-t-il. *Mais pas par imitation, en tout cas, je n'en ai jamais eu la preuve. Et cela fait toute la différence »*, insiste-t-il. Longtemps, il a ainsi contesté l'autre emblème des cultures animales, pendant chez les oiseaux des macaques de Koshima : les mésanges britanniques.

Le village de Swaythling, près de Southampton, ne brillait pas par son originalité. Chaque matin, le laitier y déposait ses bouteilles sur le pas des portes. Jusqu'à ce jour de 1921 où un habitant trouva son flacon vandalisé. Le capuchon avait été percé, la crème dérobée. Le phénomène s'étendit dans le village, on finit par trouver le coupable : *Cyanistes caeruleus*, la mésange bleue. On changea les capuchons, les mésanges s'adaptèrent. Et le pillage se répandit peu à peu. En 1949, l'essentiel de l'Angleterre et du Pays de Galles était concerné. Au point que James Fisher et Robert Hinde, sommités de l'ornithologie, furent convoqués. Analysant les différents foyers successifs et la dynamique de progression, ils en conclurent que plusieurs innovateurs avaient parallèlement découvert la combine, rapidement imités par leurs congénères.

Culture ? Expérience à l'appui, Bennett Galef assura, en 1984, que des mésanges à tête noire américaines pouvaient reproduire le forfait de leurs cousines britanniques soit spontanément, soit après avoir observé une bouteille ouverte. Culture peut-être, concluait-il, mais imitation, sûrement pas. Pendant trente ans, la question demeura en suspens. Jusqu'à ce que la biologiste Lucy Aplin, du Max Planck Institute de Radolfzell (Allemagne), conduise, en terre anglaise et à grande échelle (plus de 400 individus), une série d'expériences avec des mésanges. A la façon de Whiten, en 2005, elle conçoit une mangeoire avec une porte coulissante susceptible d'être ouverte de droite à gauche ou de gauche à droite et apprend l'une des deux techniques à quelques démonstratrices, qu'elle replace ensuite dans différents groupes d'oiseaux. Elle constate que chaque groupe adopte la technique de ses modèles. Mais aussi que la translocation d'un oiseau d'un groupe à l'autre conduit tout transfuge à adopter les manières de ses nouveaux condisciples. *« A Rome, fais comme les Romains »*, commente Andrew Whiten, citant Ambroise de Milan (340-397). Ce qu'en psychologie on nomme la conformité.

Et ce n'est pas tout : l'apprentissage se transmet de génération en génération, même après le départ des premières initiées, ajoute Lucy Aplin dans son article, publié en 2014 dans *Nature*. De plus en plus vite et de mieux en mieux. Un constat essentiel si l'on songe que les cultures humaines sont dites cumulatives, à savoir que chaque génération améliore la connaissance de la précédente. *« Ce sera une de nos principales directions de travail à venir »*, indique Lucy Aplin, consciente que les exemples d'apprentissages sociaux cumulatifs chez les animaux demeurent exceptionnels. L'autre devrait s'attacher à suivre le réseau de transmission culturelle. Déjà, dans l'article de *Nature*, elle a montré que la chance d'un individu ignorant d'acquérir le nouveau savoir était proportionnelle aux contacts qu'il entretenait avec un sachant. *« Mais là encore il faut aller plus loin, examiner les caractéristiques individuelles, le sexe, l'âge de chaque oiseau »*, dit-elle.

Hérédité culturelle

Jusqu'où les processus sont-ils cumulatifs ? Comment s'articulent conformité et innovation ? Quel réseau suit l'apprentissage dans les grands groupes ? Et qu'est-ce que ces observations peuvent nous dire sur l'émergence de la culture chez les humains ? Des chants des moineaux aux itinéraires migratoires des mouflons, des préférences alimentaires des orques aux techniques de chasse des suricates, les animaux offrent une panoplie toujours plus étendue pour approcher ces questions.

Dans les 17 mètres carrés de son laboratoire toulousain, Etienne Danchin jubile. Pas mécontent d'avoir fait descendre encore un peu *Homo sapiens* de son piédestal. Mais surtout heureux d'alimenter la conviction qui l'anime depuis vingt ans, à savoir que *« l'évolution n'est pas seulement un processus génétique »*. Des centaines de scientifiques en sont désormais convaincus, qui ont créé, il y a deux ans, la Cultural Evolution Society. Il se murmure qu'anthropologues et écologues y ont trouvé une langue commune. Une hérédité culturelle, des humains aux mouches ? Et pourquoi pas aux plantes ? Les moustaches en guidon de vélo d'Etienne Danchin se redressent. Il sourit : *« C'est encore un peu tôt. »*

Nathaniel Herzberg, *Le Monde* daté du 20.03.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

La notion de culture a longtemps été réservée à la seule espèce humaine. Mais l'observation prolongée des comportements de différentes espèces animales a mis en évidence que de nombreuses espèces, notamment les mammifères et les oiseaux, possédaient une culture, c'est-à-dire un ensemble de pratiques acquises non pas génétiquement mais par apprentissage social, par imitation. **Cet article fait le point sur l'évolution des connaissances sur la culture des animaux alors qu'une transmission culturelle d'un comportement vient juste d'être décrite chez des mouches, les drosophiles.** Aujourd'hui, l'espèce humaine n'est plus considérée comme la seule espèce à posséder une culture, même si celle-ci est particulièrement diversifiée et cumulative, c'est-à-dire transmissible de génération en génération.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

Depuis l'apparition de la vie sur la Terre et leur hypothétique ancêtre commun LUCA (*last universal common ancestor*), les êtres vivants se sont diversifiés. La biodiversité, qui se définit à différentes échelles, correspond notamment à la diversité des espèces, mais aussi à la diversité au sein de celles-ci. Au cours de l'histoire de la Terre, la biodiversité a explosé à certaines périodes et a chuté lors de crises biologiques, en lien avec des modifications des milieux de vie. Ainsi, la biodiversité évolue constamment selon divers mécanismes, les innovations se maintenant ou non dans les populations sous l'effet de la dérive génétique et de la sélection naturelle.

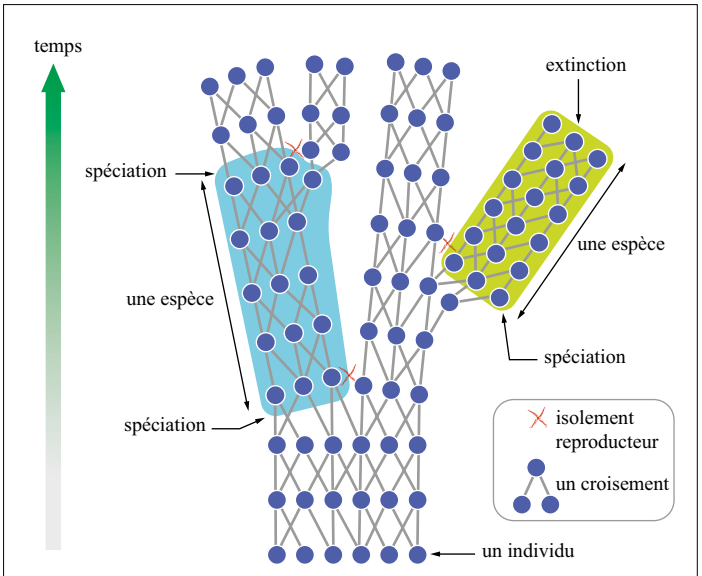
La diversité des populations change au cours des générations

Dans une population, la fréquence des différents allèles peut évoluer de manière aléatoire si ces allèles n'apportent ni avantage ni désavantage aux individus qui les portent. Le hasard des brassages au cours de la reproduction sexuée détermine l'évolution de la population, de façon d'autant plus marquée que celle-ci est petite. Il s'agit de **la dérive génétique.** Dans un milieu donné, selon les allèles dont ils sont porteurs, certains individus vont mieux survivre (ils se nourrissent plus facilement ou échappent aux prédateurs) et/ ou davantage se reproduire (ils attirent davantage les partenaires). Ces individus engendrent plus de descendants que les autres et transmettent ainsi davantage leurs allèles aux générations suivantes. La conséquence dans la population est une augmentation de la fréquence des allèles dont ces individus sont porteurs, c'est **la sélection naturelle.**

L'espèce : un concept délicat à définir

La définition de **l'espèce** a été modifiée au cours de l'histoire de la biologie. Plusieurs définitions se sont succédé et reposent sur des critères variés.

– Cuvier (1769-1832) : « Une espèce est un ensemble d'êtres vivants partageant des critères anatomiques et physiologiques. » Or, deux animaux se ressemblant fortement peuvent ne pas appartenir à la même espèce, car ils ne répondent pas à la définition biologique de l'espèce.



Une vision théorique de l'espèce
Un réseau généalogique fictif (cercles = individus)
(D'après *Guide critique de l'évolution* – G. Lecointre – Éd. Belin – 2009)

ZOOM SUR…

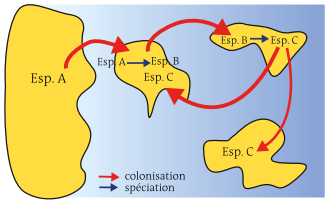
MÊME ESPÈCE OU ESPÈCES DIFFÉRENTES ?

Les lions (*Panthera leo*) et les tigres (*Panthera tigris*) peuvent engendrer des descendants uniquement en captivité, mais leurs petits (tigrons, ligres) sont stériles. Ils n'appartiennent donc pas à la même espèce.

Le fuligule morillon (*Aythya fuligula*) et le fuligule milouin (*Aythya ferina*) sont des canards qui peuvent donner expérimentalement des descendants fertiles alors qu'ils n'habitent pas les mêmes milieux. Ils sont pourtant considérés comme deux espèces différentes par les ornithologues bien que pouvant s'hybrider car, du fait de leurs milieux de vie très différents, les hybridations sont très rares.

LES PINSONS DES GALÁPAGOS

Chez les pinsons de Darwin, qui occupent différentes îles, des formes de bec variées ont été sélectionnées en fonction de la nourriture disponible.



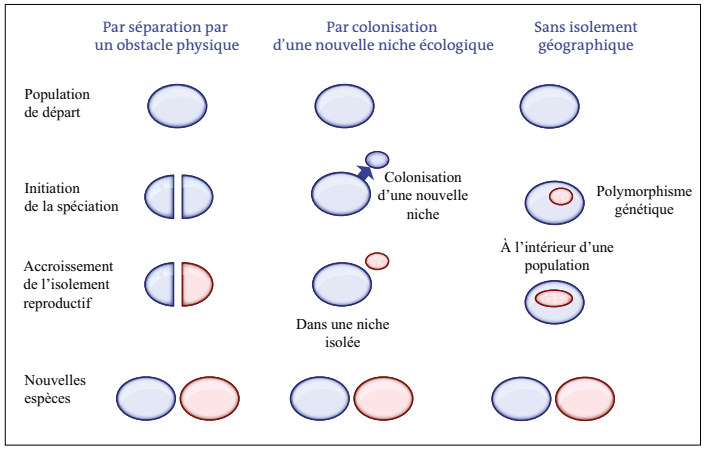
Une population d'individus issus d'une espèce A colonise une île. Au bout d'un certain temps, elle peut devenir une espèce B, dont certains individus colonisent une autre île et forment une espèce C. Cette dernière colonise les îles alentours, dont celle qui est déjà occupée par l'espèce B. Elles ne sont pas interfécondes. Leur possibilité de cohabitation dépend du fait qu'elles occupent ou non la même niche écologique. Si c'est le cas, les deux espèces entrent en compétition ce qui peut entraîner la disparition de l'une d'elles.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

– Définition biologique adoptée par Buffon (1707-1788) : « Une espèce est une communauté d'êtres vivants pouvant produire des descendants eux-mêmes féconds » (critère d'interfécondité).
– Définition écologique : une espèce est une population adaptée à une niche écologique particulière.
– Définition génétique : « Deux individus doivent avoir le même nombre de chromosomes et sur chaque chromosome le même nombre de nucléotides pour appartenir à la même espèce » Dawkins (1941-).
Actuellement, on considère que « les espèces sont des populations d'individus suffisamment isolées génétiquement des autres populations ».
Dans tous les cas, **une espèce n'est définie que durant un certain laps de temps**, délimité par son apparition (spéciation) et son extinction ou son évolution vers une autre espèce.

La spéciation ou création de nouvelles espèces

Plusieurs **mécanismes** permettent d'expliquer la naissance d'une nouvelle espèce à partir d'une espèce ancestrale.
– La séparation de populations par un obstacle physique. En effet, la spéciation peut être liée à la séparation de populations par une barrière physique (cours d'eau, relief) qui va empêcher les échanges génétiques entre deux populations de la même espèce initiale et aboutir à la divergence en deux espèces.
– La colonisation d'une nouvelle niche écologique. Des individus fondateurs se séparent de l'espèce mère pour coloniser une nouvelle niche, isolée (île) ou adjacente, mais soumise à d'autres pressions de sélection. Comme peu d'individus ont migré, tous les allèles de la population de départ ne sont pas forcément représentés aux mêmes fréquences que dans la population d'origine. Les facteurs environnementaux pouvant être différents dans le nouveau milieu colonisé, la pression de sélection peut favoriser certains allèles ou le maintien de certaines innovations génétiques.
– La spéciation sans isolement géographique. Dans un même milieu, au sein d'une population, l'apparition d'un nouvel allèle peut aboutir à former une nouvelle espèce qui exploite différemment les ressources de l'environnement ou ne peut plus se reproduire avec l'espèce initiale. En cause : l'incompatibilité des parades sexuelles ou, pour des oiseaux ou des grenouilles, le fait que leurs chants soient devenus très différents et ne leur permettent plus de se reconnaître.



Des mécanismes de spéciation

L'individualisation d'une nouvelle espèce peut prendre une durée variable, de quelques années à des millions, selon la population de départ, l'espèce considérée, le milieu et les possibilités d'échanges génétiques entre les individus.

L'extinction des espèces

Une espèce est considérée comme éteinte si l'ensemble de ses individus a disparu ou s'ils cessent d'être isolés génétiquement. Il existe des **extinctions locales** (dans une niche écologique donnée) **ou globales** (à la surface de la Terre).
L'extinction d'une espèce peut entraîner celle d'une autre espèce. Ainsi, si les abeilles disparaissent, toutes les espèces végétales dont la pollinisation est strictement dépendante de ces insectes disparaîtront.
Au cours de l'histoire de la Terre, des diminutions massives de la biodiversité ont eu lieu : la période crétacé-tertiaire est un exemple de crise biologique, avec notamment la disparition des ammonites et des dinosaures (dont les oiseaux sont les descendants).

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

• **Le dernier-né des pinsons de Darwin** p. 22
(Jérôme Grenèche, *Le Monde* daté du 09.07.2014)
• **L'extinction de masse des animaux s'accélère** p. 22-23
(Audrey Garric, *Le Monde* daté du 12.07.2017)

ZOOM SUR…

DES EXEMPLES DE SPÉCIATION

• Dans l'archipel de Madère, six espèces apparentées aux souris domestiques européennes présentent entre 22 et 30 chromosomes au lieu de 40, suite à la fusion de certains chromosomes. Ces populations non interfécondes proviennent de l'évolution de souris apportées par les bateaux des découvreurs de cette île au relief escarpé (les Vikings au IXe siècle, les Portugais au XVe siècle). Il s'agit d'un exemple de spéciation par isolement géographique.
• Dans les sous-sols de Londres, des moustiques *Culex pipiens molestus* sont génétiquement différenciés selon les lignes de métro. Ils ont évolué depuis une centaine d'années à partir d'une espèce de surface, avec laquelle ils ne sont plus interféconds. La profusion de leurs proies (les mammifères, humains comme rongeurs) transitant par ce moyen de transport, la chaleur des lieux et la présence de flaques d'eau ont accéléré le rythme de reproduction (plusieurs cycles par an), ce qui a permis une spéciation rapide.
• Aux États-Unis, les larves des mouches *Rhagoletis* consomment les baies de l'aubépine. Le développement de la culture des pommes a favorisé l'individualisation, sans isolement géographique, d'une nouvelle espèce consommatrice de pommes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.2 : Le sixième doigt des pandas

L'intitulé complet du sujet

Il existe actuellement deux espèces de pandas : le panda roux (*Ailurus fulgens)* et le grand panda (*Ailuropoda melanoleuca)*. Tous deux sont végétariens, se nourrissant de grandes quantités de feuilles de bambou. Ils présentent par ailleurs une particularité anatomique remarquable : la présence d'un sixième doigt (ou « faux pouce ») à chaque main, longtemps interprétée comme une adaptation à leur régime alimentaire. En 2005, on a découvert en Espagne un fossile daté de 9 millions d'années (*Simocyon batalleri)* apparenté aux pandas actuels et présentant lui aussi un sixième doigt.

Montrez comment l'interprétation du sixième doigt des pandas en termes d'adaptation au régime alimentaire végétarien (adaptation dont vous expliquerez les mécanismes) s'est nuancée à la lumière de nouvelles découvertes.

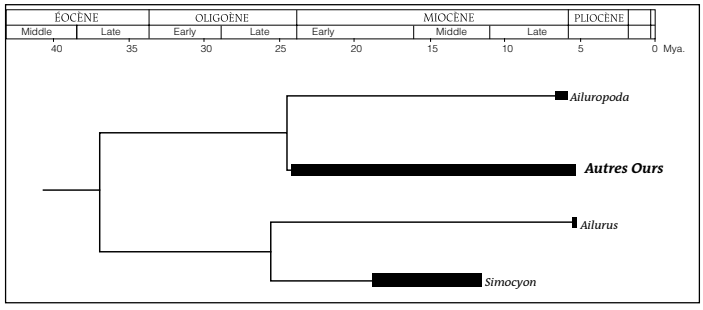
Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document de référence : Les trois « pandas » connus

Nom	*Simocyon batalleri*	*Ailurus fulgens*ou Panda roux	*Ailuropoda melanoleuca* ou Panda géant
Régime alimentaire	Carnivore	Végétarien	Végétarien
Fossile ou actuel	Fossile	Actuel	Actuel

Les documents

Document 1 : Représentation actualisée des relations de parenté entre ours et panda



Document 2

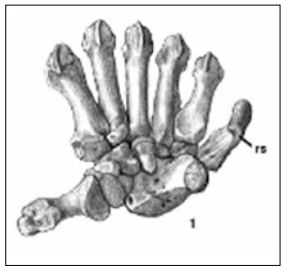
Les grands pandas géants sont des ours d'un type bien défini, membres de l'ordre des carnivores. Les ours ordinaires sont les représentants les plus omnivores de leur ordre, mais les pandas ont restreint l'universalité de leurs goûts : ils démentent l'appellation de leur ordre en tirant leur subsistance presque exclusivement du bambou. [...] Assis bien droit sur leur derrière, ils manipulent ses tiges avec leurs pattes avant, se débarrassant des feuilles pour ne consommer que les pousses. [...] Comment le descendant d'une lignée adaptée à la course peut utiliser ses mains de façon si habile ? Ils tiennent les tiges de bambou dans leurs pattes les dépouillent de leurs feuilles en faisant passer les tiges entre un pouce apparemment flexibles et les autres doigts. [...]

[...] Anatomiquement, le « pouce » du panda n'est pas un doigt. Il est construit à partir d'un os appelé le sésamoïde radial (du radius), normalement un des petits os formant le poignet. Chez le panda, le sésamoïde radial est très développé et si allongé que sa taille atteint presque celle des os des phalanges des vrais doigts. [...] L'allongement du sésamoïde radial a pu être provoqué par une transformation génétique, peut-être une seule mutation affectant le rythme et la vitesse de la croissance. [...] Le vrai pouce du panda, trop spécialisé pour être utilisé à une autre fonction et devenir un doigt opposable, apte à la manipulation, est relégué à un autre rôle. Le panda est donc contraint de se servir des organes disponibles et de choisir cet os du poignet hypertrophié, solution quelque peu bâtarde mais très fonctionnelle.

Le faux pouce du panda géant est en réalité un os du carpe (os plat de la paume) transformé en « pouce » opposable. (Noté **rs** pour os sésamoïde radial)

Source : Extrait de *Le Pouce du panda ou les grandes énigmes de l'évolution*, Stephen Jay Gould, 1980

Document 3



Os de la main du panda géant

ZOOM SUR...

LA VIE DE CHARLES DARWIN

1809
Le 12 février : naissance à Shrewsbury (Angleterre) de Charles Darwin. En France, Lamarck présente sa théorie transformiste.

1831
Le 27 décembre, Darwin s'embarque comme naturaliste sur le *Beagle* pour un voyage autour du monde qui durera cinq ans.

1835
Le *Beagle* fait escale aux Galápagos, où Darwin note des variations dans la forme des becs des pinsons, ce qui inspirera sa théorie.

1837
Première esquisse, par Darwin, d'un arbre évolutionnaire figurant dans son *Notebook on Transmutation of Species*.

1858
Présentation à Londres d'articles en commun avec Wallace sur la perpétuation des variétés et des espèces par les moyens naturels de la sélection.

1859
Publication de *De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle ou la Préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie.*

1871
Darwin livre ses vues sur l'origine de l'homme dans *La Filiation de l'homme et la sélection liée au sexe.*

1882
Mort de Darwin dans sa demeure de Down, dans le Kent. Il sera enterré à l'abbaye de Westminster.

Source : « Dates clés de la vie de Charles Darwin », *Le Monde*, 6 février 2009.

PERSONNAGE CLÉ

STEPHEN JAY GOULD (1941-2002)

Paléontologue américain, coauteur de plusieurs idées théoriques sur l'évolution. Il doit sa renommée à ses nombreux essais, dont *Le Pouce du panda*, et à sa participation active à la lutte contre le créationnisme aux États-Unis.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

« En étudiant sa denture, nous sommes arrivés à la conclusion que cet animal mangeait essentiellement de la viande, et non des végétaux comme le petit panda actuel, annonce Stéphane Peigné, jeune chercheur au Laboratoire de géobiologie, biochronologie et paléontologie humaine. C'est pourquoi nous pensions que *Simocyon* n'utilisait pas son sixième doigt pour saisir les pousses de bambou comme le fait aujourd'hui le petit panda, mais plus certainement pour aider à sa locomotion dans les arbres. » Et comme les données recueillies sur le site indiquent qu'il vivait dans un environnement peuplé de nombreux prédateurs, « cette étrange facétie de l'évolution de doter *Simocyon* d'un faux pouce apparaît, dans ce contexte, vitale pour ce carnivore plutôt charognard et peu véloce : il pouvait donc leur échapper en grimpant aisément dans les arbres », poursuit le paléontologue

Source : extrait d'un communiqué de presse du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) à propos de la découverte de *Simocyon batalleri* (mars 2005)

Ce qu'il ne faut pas faire

- Faire une analyse exhaustive de tous les documents sans lien avec la problématique.
- Se dispenser d'apporter des connaissances.
- Omettre d'indiquer clairement les relations entre les différents arguments.

Analyse du sujet

La réponse argumentée doit s'appuyer sur les informations pertinentes des documents, mises en relation entre elles et avec les connaissances. Elle comportera deux parties distinctes : une proposition de scénario ayant conduit à l'apparition et au maintien du sixième doigt chez les pandas (mécanismes évolutifs) ; puis comment l'interprétation de cette adaptation a été nuancée suite à la découverte d'un fossile.

Proposition de corrigé

Différents scénarios évolutifs peuvent être acceptés s'ils sont plausibles et sans contradiction avec les documents.

I. Mécanismes ayant conduit à l'apparition et au maintien du sixième doigt chez les pandas : proposition de scénario

Exploitation du document 1

Les pandas ont des liens de parenté avec les ours (plus particulièrement le grand panda) et l'espèce fossile *Simocyon* est un parent plus proche des pandas roux que du grand panda.

Exploitation du document 2

Les pandas actuels ont un sixième « doigt » adapté à leur régime alimentaire de type végétarien (bambou). Cette particularité anatomique a peut-être une origine génétique : une mutation dans un gène qui modifie la croissance de l'os sésamoïde radial.

Cette innovation génétique serait due au hasard, faisant apparaître le faux pouce probablement chez l'ancêtre commun à tous les pandas.

Certaines innovations peuvent donner un avantage aux individus dans un milieu donné. L'innovation a dans ce cas plus de chances d'être transmise à la descendance et de diffuser dans la population : c'est la sélection naturelle.

Il peut donc y avoir conservation de l'innovation si elle n'est pas une gêne et diffusion si elle confère un avantage sélectif, dans deux situations différentes : chez *Simocyon* carnivore pour fuir les prédateurs (document 3), chez les pandas pour se nourrir (document 2). Cette innovation n'a pas été conservée dans le groupe des ours.

II. Comment l'interprétation du sixième doigt des pandas a été nuancée suite à la découverte d'un fossile

Avant la découverte : le sixième doigt des pandas était interprété comme une adaptation à leur régime alimentaire.

Après la découverte de *Simocyon* : il est interprété comme une adaptation chez *Simocyon* pour fuir les prédateurs en grimpant aux arbres ; chez les pandas, pour saisir les branches de bambou. L'innovation, partagée par les pandas géants, les pandas roux et *Simocyon* serait apparue chez l'un de leurs ancêtres communs, mais n'aurait pas été conservée chez les ours.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1 :
– Expliquer les mécanismes qui déterminent l'évolution de la fréquence d'un allèle dans une population (dérive génétique, sélection naturelle).

Partie 2. 1 :
– Nuancer la définition de l'espèce à partir d'exemples d'hybrides interspécifiques.

Partie 2. 2 :
– Analyser, à partir de documents, des exemples de spéciation dans des contextes et selon des mécanismes variés.

ZOOM SUR…

LA PHALÈNE DU BOULEAU

Papillon nocturne qui existe sous une forme claire, camouflée des prédateurs sur les troncs clairs du bouleau, et une forme sombre. L'étude de l'évolution de la fréquence relative de ces deux formes au sein des populations de papillons à partir du XIX^{e} siècle en Angleterre constitue un exemple classique pour expliquer le principe de la sélection naturelle. La forme sombre, observée pour la première fois en 1848, est devenue majoritaire dans les régions industrialisées, où les troncs des arbres deviennent plus sombres. La survie différentielle des deux formes de papillons, qui échappent plus ou moins facilement à leurs prédateurs sur les troncs clairs ou sombres, détermine le nombre de leurs descendants et l'évolution de la fréquence des deux allèles impliqués.

SPÉCIATION ET SÉLECTION NATURELLE

Aux États-Unis, les vallées de Sacramento et San Joaquim sont trop sèches pour permettre à la salamandre de Californie d'y vivre. En colonisant le milieu, une partie de la population initiale a contourné les vallées sèches par la zone montagneuse de l'est, tandis que l'autre est passée par la zone côtière à l'ouest. Les salamandres des zones montagneuses sont tachetées, ce qui leur assure un bon camouflage vis-à-vis des prédateurs. Les salamandres des zones côtières sont rouges, comme les animaux venimeux vivant dans ce milieu. Les deux populations ont poursuivi leur migration vers le sud jusqu'à la convergence des deux vallées : les salamandres de l'est et de l'ouest n'y sont plus interfécondes, il s'agit de deux espèces différentes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le dernier-né des pinsons de Darwin

Ces oiseaux-là appartiennent déjà à l'Histoire. Originaires des îles Galapagos, ils sont entrés en Europe dans les malles de Charles Darwin (1809-1882). Le 4 janvier 1837, le naturaliste britannique en présente plusieurs spécimens devant la – Société géologique de Londres. Des pinsons de tailles et de becs si divers qu'il ne leur voit qu'un lointain cousinage… Il faudra l'intervention de son collègue l'ornithologue John Gould (1804-1881) pour réunifier la famille. Et offrir au génie un des modèles de sa future théorie de l'évolution. Les treize espèces en garderont un nom commun : « les pinsons de Darwin ». La plupart des oiseaux semblent venir d'îles différentes. De quoi nourrir l'intuition du savant de l'importance de l'isolement géographique dans l'apparition d'espèces distinctes. Il parvient en outre à associer la forme des becs au régime alimentaire disponible. On connaît sa conclusion, inscrite au cœur de notre connaissance : soumise à une pression de l'environnement, chaque espèce évolue par sélection des traits les plus favorables.

Un mouvement accompli sur des millénaires… Seulement Darwin n'avait pas tout vu. Non seulement la spéciation peut intervenir hors isolement géographique, mais elle peut aussi se dérouler beaucoup plus rapidement qu'il ne le pensait. En 2016, des chercheurs suisses avaient documenté l'émergence de deux écotypes d'épinoches dans le lac de Constance en moins de cent cinquante ans. L'étude publiée le 23 novembre dans la revue *Science* frappe plus fort encore : elle met en évidence l'apparition d'une nouvelle espèce d'oiseaux en… trois générations. Ultime pied de nez, l'observation a été conduite chez des pinsons de Darwin.

Chant spécifique

Pendant près de quarante ans, Peter et Rosemary Grant ont étudié les oiseaux de Daphne Major, un îlot volcanique des Galapagos. Ils les ont bagués, mesurés, ont prélevé des échantillons sanguins. Aujourd'hui professeurs émérites à Princeton (Etats-Unis), le couple d'octogénaires a délaissé son île. Il poursuit ses études sur le terrain génétique, avec l'assistance de l'université d'Uppsala, en Suède. Leur nouvel article s'appuie sur ce que Guillaume Lecointre, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, qualifie de *« travail unique avec une profondeur exceptionnelle »*. En 1981, les Grant avaient observé l'arrivée d'un pinson venu d'ailleurs, 70 % plus gros, et son accouplement avec une femelle locale. Ils avaient ensuite scrupuleusement répertorié les unions et naissances. C'est pourtant la génomique qui leur permet aujourd'hui de livrer leurs étonnantes conclusions. D'une part, l'immigrant ne provenait pas d'un îlot voisin, comme ils le pensaient, mais d'Española, à 100 km de là. Surtout, passé l'événement originel, la lignée n'a connu qu'une seule autre union « mixte », à la deuxième génération. *« La rapidité de l'évolution de l'espèce et surtout de la fin des croisements est assez remarquable »*, note, modestement Peter Grant.

Nul doute, en effet, que c'est bien une nouvelle espèce qui est apparue. Son bec, sa taille, la niche qu'elle occupe dans la distribution de la ressource alimentaire, le chant tout à fait spécifique des mâles et bien sûr son endogamie réunissaient toutes les caractéristiques d'un tel constat. Leif Andersson, de l'université d'Uppsala, y a ajouté les particularités génomiques, extraites de 49 individus. *« Leur travail de terrain était formidable, nous l'avons juste confirmé »,* précise le généticien suédois. Reste seulement à nommer l'animal. Le couple américain songe à *Geospiza strenuirostris*. Mais au vu du nombre limité de générations observées, faute aussi d'une description formelle complète, l'équipe a choisi de présenter encore l'espèce comme un lignage. Et de se contenter d'un surnom : « Big bird ».

Nathaniel Herzberg, *Le Monde* daté du 06.12.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'évolution des espèces peut conduire à l'apparition de nouvelles espèces, appelée « spéciation ». Au milieu du XIXe siècle, en plein Pacifique, Darwin étudie les populations des pinsons des îles de l'archipel des Galapagos, et ses observations contribuent à forger son explication de l'évolution des espèces. Darwin propose que des populations isolées les unes des autres et soumises à des pressions de sélections différentes évoluent indépendamment, ce qui peut conduire à des phénomènes de spéciation. **Cet article décrit les observations d'une étude récente menée sur ces pinsons dits « de Darwin ».** Dans la population de pinsons d'une des îles de l'archipel, deux croisements successifs avec des pinsons venant d'une autre île ont entraîné l'apparition d'une nouvelle espèce de pinsons en seulement trois générations. C'est donc un exemple de spéciation extrêmement rapide qui est ici présenté, à travers l'étude d'un cas historiquement emblématique.

L'extinction de masse des animaux s'accélère

Les espèces de vertébrés reculent dramatiquement sur Terre, à la fois en termes de populations et d'étendue.

C'est ce qu'ils nomment *« un anéantissement biologique »*. Dans une étude très alarmante, publiée lundi 10 juillet dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, des chercheurs américains et mexicain concluent que les espèces de vertébrés reculent de manière massive sur Terre, à la fois en nombre d'animaux et en étendue. Une *« défaunation »* aux conséquences *« catastrophiques »* pour les écosystèmes et aux impacts écologiques, économiques et sociaux majeurs.

Les trois auteurs, Gerardo Ceballos (Université nationale autonome du Mexique), Paul Ehrlich et Rodolfo Dirzo (Stanford) n'en sont pas à leur coup d'essai sur le thème de l'érosion de la biodiversité.

En juin 2015, les deux premiers avaient déjà publié une autre étude dans la revue *Science Advances,* qui montrait que la faune de la Terre était d'ores et déjà en train de subir sa sixième extinction de masse. Ils avaient calculé que les disparitions d'espèces ont été multipliées par 100 depuis 1900, soit un rythme sans équivalent depuis l'extinction des dinosaures il y a 66 millions d'années.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

« Ampleur sous-estimée »

Cette fois, les chercheurs ont cherché à quantifier le déclin non plus du nombre d'espèces mais des populations, c'est-à-dire des groupes d'animaux sur un territoire. *« L'accent mis sur l'extinction des espèces peut donner l'impression que la biodiversité terrestre n'est pas dramatiquement et immédiatement menacée, mais qu'elle entre juste lentement dans un épisode d'érosion majeur, que l'on pourra combattre plus tard »*, expliquent les auteurs.

Cette approche présente plusieurs défauts à leurs yeux : l'opinion publique peine à mesurer la gravité du phénomène à l'œuvre (deux espèces disparaissent chaque année, ce qui paraît faible, surtout quand ces dernières sont peu connues ou peu répandues). Et elle ne permet pas de correctement évaluer le problème en cours. Les espèces les plus communes (dont les populations sont largement présentes) enregistrent des reculs massifs de leurs effectifs, sans pour autant être déjà menacées. *« Or, la disparition des populations est un prélude à celle des espèces,* préviennent les scientifiques. *Une analyse détaillée du déclin des effectifs d'animaux rend le problème bien plus clair et inquiétant. »*

Les chercheurs ont alors mené une vaste analyse, sur la moitié des espèces de vertébrés connues : ils ont examiné les évolutions des populations de 27 600 espèces de mammifères, oiseaux, reptiles et amphibiens terrestres, réparties sur les cinq continents, en utilisant la base de données de la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), qui constitue l'inventaire mondial le plus complet de l'état de conservation de la biodiversité. Ils ont également passé à la loupe, plus spécifiquement, 177 espèces de mammifères, pour lesquels ils avaient des données sur l'aire de répartition entre 1900 et 2015.

« La réelle ampleur de l'extinction de masse qui touche la faune a été sous-estimée : elle est catastrophique », jugent-ils. Au total, 32 % des espèces étudiées déclinent en termes de population et d'étendue. Plusieurs mammifères qui se portaient bien il y a une ou deux décennies sont maintenant en voie de disparition.

En 2016, la planète ne comptait que 7 000 guépards et 35 000 lions africains (– 43 % depuis 1993). Les populations d'orangs-outans de Bornéo ont chuté de 25 % ces dix dernières années, pour atteindre 80 000 individus, tandis que celles de girafes sont passées de 115 000 spécimens en 1985 à 97 000 en 2015. Celles de pangolins ont été décimées.

« Un signe fort »

Ce que l'on sait moins, c'est que près de 30 % de ces espèces en déclin sont considérées comme communes. Elles sont (encore) classées en tant que « faible préoccupation » et non pas « en danger » par l'UICN. En France, le chardonneret a, par exemple, enregistré une baisse de 40 % de ses effectifs depuis dix ans. *« Qu'autant d'espèces communes voient leurs effectifs diminuer est un signe fort de la gravité de l'épisode d'extinction biologique actuel »*, prévient Gerardo Ceballos.

Tous les continents sont concernés par cette érosion spectaculaire de la biodiversité. Les zones les plus touchées, notamment pour les mammifères et les oiseaux, sont celles situées aux tropiques (Amazonie, bassin du Congo, Asie du Sud-Est) car ce sont les plus riches en termes de faune. Mais les régions tempérées enregistrent des taux similaires voire plus élevés en valeur relative – c'est-à-dire comparé à la richesse de leur biodiversité.

Corollaire de la perte d'effectifs, la faune voit son territoire diminuer comme une peau de chagrin. Parmi les 177 espèces de mammifères scrutées plus spécifiquement par l'étude, 40 % ont perdu 80 % de leur aire de répartition historique depuis 1900. Cas emblématique, le lion a longtemps régné sur la majeure partie de l'Afrique, du sud de l'Europe et du Moyen-Orient, jusqu'au nord-ouest de l'Inde ; on ne compte aujourd'hui qu'une poignée de populations dispersées en Afrique subsaharienne et une population dans la forêt de Gir, en Inde.

Au total, plus de 50 % des animaux ont disparu depuis quarante ans, estiment les scientifiques, qualifiant leurs résultats de *« prudents »*. Des conclusions qui confirment celles du dernier rapport « Planète vivante », publié en octobre 2016 par le Fonds mondial pour la nature (WWF) : il estimait que les populations de vertébrés ont chuté de 58 % entre 1970 et 2012. L'intérêt de la nouvelle étude, publiée dans les *PNAS,* réside dans le jeu de données bien plus vaste (27 600 espèces examinées contre 3 700 pour le WWF) et l'analyse géographique.

« L'approche de cette étude est très intéressante : au lieu de se focaliser sur les extinctions, que l'on a du mal à quantifier, elle se concentre sur l'évolution des populations, qui confirme et renseigne sur la gravité de la situation », juge Benoît Fontaine, biologiste de la conservation au Muséum national d'histoire naturelle, qui n'a pas participé à l'étude.

« Cette publication montre que la situation est très alarmante, plus que ce que peut laisser voir notre liste rouge », abonde Florian Kirchner, chargé du programme « espèces » pour la branche française de l'UICN, qui n'émet qu'une réserve : avoir concentré l'analyse sur les seuls vertébrés terrestres – les plus étudiés – et non les poissons, les invertébrés et les plantes, dont les populations reculent aussi massivement. Selon l'UICN, 42 % des espèces d'invertébrés terrestres (papillons, vers de terre, etc.) et 25 % de celles d'invertébrés marins (comme les bivalves ou éponges) sont menacés d'extinction.

Dégradation de l'habitat

Les causes de ces reculs sont connues : ils sont imputables, en premier lieu, à la perte et à la dégradation de l'habitat sous l'effet de l'agriculture, de l'exploitation forestière, de l'urbanisation ou de l'extraction minière. Viennent ensuite la surexploitation des espèces (chasse, pêche, braconnage), la pollution, les espèces invasives, les maladies et, plus récemment, le changement climatique. *« Les moteurs ultimes de la sixième extinction de masse sont moins souvent cités, jugent les auteurs. Il s'agit de la surpopulation humaine, liée à une croissance continue de la population, et de la surconsommation, en particulier par les riches. » « Nous ne disposons que d'une petite fenêtre pour agir, deux ou trois décennies au maximum »,* préviennent-ils. Il en va de la survie de la biodiversité et de l'humanité. *« L'érosion des espèces entraîne de graves conséquences en cascades sur l'ensemble des écosystèmes, ainsi que des impacts économiques et sociaux pour l'humain »*, rappelle Gerardo Ceballos. La faune et la flore nous rendent en effet de nombreux services, qu'il s'agisse de la pollinisation, de l'amélioration de la productivité des terres, de l'assainissement de l'air et de l'eau ou du stockage du CO_2.

Parmi les actions prioritaires, les scientifiques appellent à réduire la croissance de la population humaine et de sa consommation, à utiliser des technologies moins destructrices pour l'environnement, à endiguer le commerce des espèces en voie de disparition ou encore à aider les pays en développement à maintenir les habitats naturels et à protéger leur biodiversité.

Audrey Garric, *Le Monde* daté du 12.07.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

La durée de nos vies humaines nous rend difficile l'appréhension des modifications évolutives du vivant, qui ont lieu souvent sur de longues périodes. Actuellement, sur Terre, une évolution majeure du vivant est cependant observable à notre échelle : la réduction drastique de la biodiversité, résultant de l'extinction de nombreuses espèces sous l'effet des activités humaines. **L'article proposé ici présente une vaste étude effectuée par des chercheurs américains et mexicain sur l'évolution des populations de plus de 27 000 espèces de vertébrés,** quant à leurs effectifs et l'extension de leurs territoires. Les conclusions apparaissent alarmantes : plus de 30 % des espèces étudiées, y compris des espèces pourtant communes, voient leur population décliner et leur aire de répartition se réduire. Selon les auteurs de cette étude, un véritable anéantissement biologique se prépare et il est urgent d'agir rapidement pour espérer l'enrayer.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

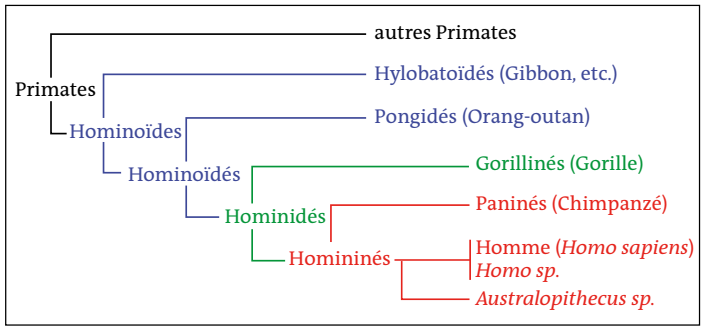
Un regard sur l'évolution de l'homme

L'espèce humaine appartient à l'ordre des primates, qui regroupe environ 230 espèces d'une grande diversité et dont les comparaisons anatomiques et moléculaires permettent de préciser les liens de parenté. Le séquençage des génomes de l'homme et du chimpanzé a révélé une identité de plus de 99 %. Ainsi, les études génétiques et l'observation du développement de l'homme et de son plus proche parent permettent de comprendre comment se construisent leurs phénotypes différents à partir d'un patrimoine génétique très proche. L'histoire de la lignée humaine, dont l'homme actuel est l'unique représentant, montre une évolution buissonnante. Sa phylogénie reste discutée et révisable à tout moment, au gré des découvertes de fossiles.

La place de l'homme parmi les primates

Les primates partagent **des caractères communs,** dont un pouce opposable aux autres doigts de la main, des ongles plats et des orbites en façade (favorisant une vision binoculaire). Les grands singes dits « **hominoïdes** » se caractérisent par l'absence de queue et la pratique au moins partielle de la bipédie. Excepté l'homme, qui a colonisé toute la planète, les primates vivent dans les régions intertropicales du globe (Australie exclue).

L'étude des caractères anatomiques ne permet pas forcément de préciser **les liens de parenté** au sein du groupe des hominoïdes dont fait partie l'homme. Les comparaisons chromosomiques et moléculaires sur de nombreux gènes montrent que les plus proches parents de l'homme sont les chimpanzés. Elles ont permis d'établir **l'arbre phylogénétique** des primates et d'estimer les dates de divergence entre les lignées.



Arbre phylogénétique des primates

Les plus lointains **ancêtres communs** à l'ensemble des primates seraient apparus il y a 65 à 50 millions d'années (Ma) en Afrique. Les hominoïdes seraient apparus il y a 23 millions d'années, les hominidés (dont font partie les gorilles, les chimpanzés et les hommes), il y a 10 millions d'années. Les primates partageant l'ancêtre commun le plus récent avec l'homme actuel sont les chimpanzés (*Pan troglodytes*) et les bonobos (*Pan paniscus*).

Les premiers représentants de la lignée humaine, qui ont donc un ancêtre commun avec l'homme plus récent qu'avec les chimpanzés, seraient apparus il y a 5 à 10 millions d'années.

Les caractères distinctifs de l'homme

L'homme se distingue du chimpanzé par un ensemble de caractères dont certains sont liés à **la bipédie permanente** : un trou occipital avancé, des membres antérieurs réduits par rapport aux membres postérieurs, un bassin court et large et des fémurs convergents en sont des exemples. Par rapport à celui du chimpanzé, le crâne de l'homme témoigne d'un volume cérébral plus important, et sa face est aplatie. D'autres différences s'observent dans la mâchoire et la dentition. Les témoignages d'activités culturelles (outils, gravures, peintures rupestres, etc.) sont très développés. Lorsqu'un fossile présente au moins l'un de ces caractères distinctifs, il est susceptible d'être placé au sein de **la lignée humaine**, sans pour autant être considéré comme un ancêtre direct de l'homme actuel.

La construction du phénotype humain

L'analyse de 97 gènes fonctionnels de l'homme et du chimpanzé a montré une coïncidence de **99,4 %**. L'étude du développement pré et post-natal chez les deux espèces permet de comprendre comment de si petites différences génétiques peuvent aboutir à **des phénotypes distincts**.

ZOOM SUR...

LA PLACE DE L'HOMME DANS LE MONDE VIVANT

L'homme fait partie, avec les grands singes, du groupe des hominoïdes, qui appartient à l'ordre des primates. Comme tous les mammifères, il est un vertébré amniote et tétrapode, caractéristique partagée avec les amphibiens, les reptiles et les oiseaux. Enfin, il partage avec tous les autres animaux des caractéristiques encore plus anciennes, comme la nature de ses cellules, qui sont eucaryotes.

NOTIONS CLÉS

ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE

Traduit des liens de parenté entre des espèces. Pour chaque caractère on définit deux états, l'un étant dérivé de l'autre. Le passage de l'état ancestral à l'état dérivé d'un caractère est une innovation évolutive qui a nécessairement été transmise de génération en génération jusqu'aux organismes observés. Les nœuds de l'arbre indiquent le dernier ancêtre commun des espèces qui partagent des caractères dérivés exclusifs. L'arbre phylogénétique dit « qui partage quoi avec qui » et donc « qui est le plus proche parent de qui » et non pas « qui descend de qui » (G. Lecointre, « La construction de phylogénies », *APBG*, 1995 ; 1 : 109-36).

LES FOSSILES NE SONT PAS DES ANCÊTRES

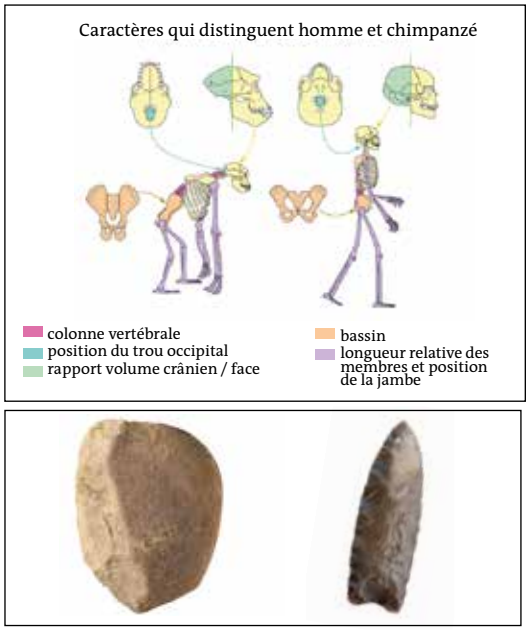
Les fossiles correspondent à des espèces réelles ayant vécu durant une période géologique donnée et ne coïncident pas avec les nœuds des arbres phylogénétiques.

PARENTÉ

Chercher la parenté c'est « chercher le groupe frère, et non l'ancêtre. Il s'agit, pour une espèce donnée, du groupe avec lequel elle partage une innovation évolutive exclusive : elle ne la partage avec aucun autre groupe. L'ancêtre au sens propre restera toujours inconnaissable, mais on peut déduire certains des caractères qu'il devait posséder, les caractères dérivés qui définissent le groupe » (G. Lecointre, *op. cit.*).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Dans les deux cas, le phénotype s'acquiert sous l'effet de l'interaction entre l'expression de l'information génétique et l'environnement.



Deux exemples d'outils découverts à proximité de fossiles de la lignée humaine (à gauche : galet aménagé ; à droite : biface).

Des mutations affectant l'expression des gènes homéotiques peuvent induire des ralentissements ou accélérations de certaines phases du développement, ayant pour conséquence des modifications anatomiques (taille, forme et position d'éléments du squelette). Ainsi, lors du développement embryonnaire chez l'homme, l'allongement des phases de mise en place du système nerveux conduit à un développement plus important du cerveau que chez le chimpanzé.
L'homme conserve à l'âge adulte des caractéristiques qui n'existent que chez les jeunes primates : on parle de **néoténie**. En particulier le trou occipital reste central et permet la bipédie chez l'homme, tandis qu'il recule au cours du développement post-natal du chimpanzé quadrupède.
La relation aux autres individus, les interactions sociales (apprentissages, transmission des cultures, etc.) contribuent à façonner ce phénotype déterminé génétiquement.

Une évolution buissonnante

De nos jours, la lignée humaine est représentée par la seule espèce ***Homo sapiens,*** mais elle a été précédée par de nombreuses espèces disparues, notamment des genres *Australopithecus* et *Homo*.
Orrorin tugenensis et *Ardipithecus kadabba* (– 6 Ma) en Afrique orientale et *Sahelanthropus tchadensis* « Toumaï » (– 7 Ma) en Afrique centrale sont les plus anciens hominiinés découverts.
Les australopithèques ont vécu de – 4,2 Ma à – 1 Ma ; on trouve de nombreux fossiles en Afrique de l'Est. Les traces de pas du site de Laetoli en Tanzanie attestent de leur bipédie, il y a 3,6 Ma.
Le genre *Homo* regroupe des espèces bipèdes avec une boîte crânienne plus volumineuse, une réduction de la face et des canines réduites. ***Homo habilis*** en est le premier représentant connu, les fossiles les plus anciens retrouvés en Afrique sont datés de – 2,3 Ma.
Homo erectus (– 1,8 à – 0,6 Ma) est le premier à domestiquer le feu et à produire et utiliser des outils plus sophistiqués : les bifaces. Certains groupes d'*Homo erectus* s'aventurent hors d'Afrique et partent à la conquête de l'Eurasie en plusieurs vagues, de – 1,7 Ma à – 120 000 ans. Leur arrivée en Europe serait datée de – 650 000 ans.
Homo sapiens serait apparu en Afrique il y a moins de 200 000 ans et aurait remplacé les populations d'*Homo erectus* au cours de ses migrations successives. Ces groupes produisaient des outils perfectionnés et variés, et enterraient leurs morts. De nombreux témoignages artistiques ont été découverts.
Homo neanderthalensis (– 80 000 à – 35 000 ans), retrouvé exclusivement en Europe, présente un crâne volumineux et un bourrelet sus-orbitaire épais. Il fabriquait des outils de pierre taillée et enterrait ses morts. Les raisons de son extinction ne sont pas totalement élucidées. Il a certainement été en compétition avec *Homo sapiens*, avec lequel des échanges génétiques ont pu avoir lieu.
La lignée humaine montre une évolution qui n'est pas linéaire mais **buissonnante** : plusieurs lignées ont évolué et cohabité, voire ont été interfécondes. L'histoire récente montre une réduction de la diversité : *Homo sapiens* est le seul représentant actuel de ce buisson touffu. Cette réduction de la diversité concerne plus généralement les hominoïdes, dont certains sont en voie d'extinction. À l'inverse, d'autres primates comme les cercopithécoïdes montrent une grande diversification à l'heure actuelle.
Une grande partie des connaissances qui permettent d'établir les arbres phylogénétiques des primates sont fondées sur des découvertes paléontologiques. Ces connaissances sont donc révisables.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

• **Les singes pourraient disparaître d'ici 25 à 50 ans** p. 27-28
(Audrey Garric, *Le Monde* daté du 20.01.2017)
• **Quand plusieurs humanités peuplaient la Terre** p. 28-29
(Hervé Morin, *Le Monde* daté du 12.04.2019)

MOTS CLÉS

HÉTÉROCHRONIE
Modification de la durée ou de la vitesse des phases du développement au cours de l'évolution.

HORLOGE MOLÉCULAIRE
Estimation de la date de divergence entre différentes lignées depuis leur dernier ancêtre commun par comparaisons moléculaires. Pour un gène donné, plus les séquences de deux espèces sont différentes, plus la divergence entre les lignées de ces deux espèces est ancienne.

NOTIONS CLÉS

ÉVOLUTION BUISSONNANTE
Les nombreux fossiles découverts ne doivent pas être considérés comme une succession d'espèces descendant les unes des autres. Ces fossiles peuvent être des représentants de lignées disparues. L'arbre phylogénétique des hominiinés ressemble à un buisson avec de multiples branches.

HOMO SAPIENS
Sur le plan de l'évolution, *Homo sapiens* est une espèce comme les autres. Il n'est pas l'aboutissement de l'évolution, et l'établissement de ses liens de parenté avec les fossiles de la lignée humaine doit être mené avec la même rigueur que pour n'importe quelle espèce. Cependant, plus les fossiles sont récents et nombreux, plus des liens de parenté précis peuvent être établis.

ZOOM SUR…

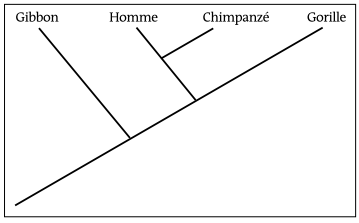
LUCY
Cette australopithèque découverte en Éthiopie en 1974 a 3 millions d'années. Son squelette a été reconstitué à 40 % grâce aux 52 fragments osseux découverts. Les australopithèques sont de petite taille, présentent une faible capacité crânienne, sont bipèdes, mais leur démarche devait être « chaloupée ».

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.1 : Liens de parenté au sein des primates

L'intitulé du sujet

À partir des seules informations recueillies par l'exploitation du document :
– placez sur l'arbre phylogénétique les innovations évolutives à l'origine des caractères dérivés du tableau ;
– citez les caractéristiques du plus récent ancêtre commun à l'homme, au chimpanzé et au gorille ;
– placez l'orang-outan sur l'arbre phylogénétique et précisez le degré de parenté entre l'orang-outan et chacune des autres espèces de l'arbre.



Arbre phylogénétique de quelques espèces de primates actuels à compléter

Le document

Espèces / Caractères dérivés	Gibbon	Homme	Chimpanzé	Gorille	Orang-outan
Absence de queue	+	+	+	+	+
Fusion prénatale des os du poignet	–	+	+	+	–
Présence d'un sinus frontal	–	+	+	+	+
Bipédie permanente	–	+	–	–	–

Le signe + signifie que le caractère dérivé est présent, le signe – signifie qu'il est absent.

L'analyse du sujet

Pour traiter ce sujet, il faut avoir compris la construction d'un arbre phylogénétique à partir de l'étude des caractères dérivés présentés par différentes espèces.

Proposition de corrigé

Les innovations se placent sur les entre-nœuds
L'absence de queue est un caractère dérivé présent chez les quatre espèces, donc chez leur dernier ancêtre commun. L'innovation évolutive est à placer avant le nœud correspondant.
La fusion prénatale des os du poignet et la présence d'un sinus frontal sont deux caractères dérivés exclusivement communs à l'homme, au chimpanzé et au gorille. Ces innovations sont à placer avant le nœud représentant le dernier ancêtre commun de ces trois espèces.

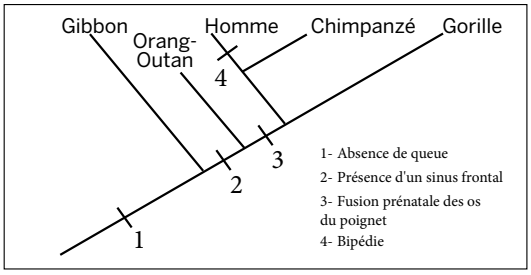
La bipédie est un caractère dérivé uniquement présent chez l'homme : ce caractère n'existait pas chez le dernier ancêtre commun de l'homme et du chimpanzé, il est à placer après le nœud.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Utiliser uniquement vos connaissances pour répondre aux questions sans faire de raisonnement logique à partir du document.

Caractéristiques du plus récent ancêtre commun à l'homme, au chimpanzé et au gorille
Cet ancêtre commun présentait les caractères dérivés communs aux trois espèces : absence de queue, présence d'un sinus frontal et fusion prénatale des os du poignet. Il ne présentait pas le caractère dérivé propre à l'homme : la bipédie.

Degré de parenté entre l'orang-outan et les autres espèces de l'arbre



Arbre phylogénétique de quelques espèces de primates actuels

L'orang-outan partage deux caractères dérivés avec l'homme, le chimpanzé et le gorille. Il ne présente pas de fusion prénatale des os du poignet. Sa branche s'intercale donc entre le dernier ancêtre commun de l'ensemble des espèces et le dernier ancêtre commun de l'ensemble homme-chimpanzé-gorille.
L'orang-outan possède avec l'homme, le chimpanzé et le gorille deux caractères dérivés et un ancêtre commun qu'il ne partage pas avec le gibbon (un seul caractère dérivé en commun). Il est donc plus proche de l'homme, du chimpanzé et du gorille que du gibbon.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1 : Positionner des espèces de primates fossiles dans un arbre phylogénétique à partir de l'étude de leurs caractères.
Partie 2.2 : Discuter de la remise en question d'un arbre phylogénétique de la lignée humaine suite à la découverte d'un fossile.
Partie 2.2 : Mettre en relation la comparaison de séquences de certains gènes et les différences morphologiques entre le chimpanzé et l'homme.

ZOOM SUR…

LA CONTROVERSE IDA

En mai 2009, à New York, *Darwinius masillae,* un fossile de 47 millions d'années baptisé « Ida », était présenté comme un possible ancêtre commun à l'ensemble des singes anthropoïdes et qualifié de « chaînon manquant » par ses découvreurs. Les études qui ont suivi cette découverte médiatisée et controversée ont montré qu'Ida était en fait un représentant d'un groupe ancêtre des lémuriens. Les comparaisons de la dentition, des mâchoires et de 360 caractères chez plus d'une centaine de primates a permis de réfuter l'hypothèse initiale. Les caractères ressemblants chez *Darwinius masillae* et les anthropoïdes seraient apparus indépendamment par convergence évolutive, sous la pression du milieu identique.

LE TROUBLE JETÉ PAR LA DÉCOUVERTE DE TOUMAÏ

La découverte d'un fossile peut poser davantage de problèmes qu'il n'en résout. Ce fut le cas de Toumaï, découvert au Tchad en 2001. Daté de 7 millions d'années, proche de la divergence entre la lignée humaine et celle des chimpanzés, *Sahelanthropus tchadensis* a semé le trouble en raison du lieu de sa découverte, et de sa morphologie. Bien plus âgé que les australopithèques, il présente des caractères « plus humains » : une face peu prognathe, des canines réduites et une probable bipédie, alors que sa capacité crânienne et sa taille devaient être comparables à celles d'un chimpanzé.

L'ÉVOLUTION N'A PAS DE BUT

Pour Teilhard de Chardin (1881-1955), l'hominisation est « l'ensemble des processus évolutifs par lesquels les hommes ont acquis les caractères qui les distinguent des autres primates ». L'hominisation concerne notamment « l'acquisition d'une bipédie de plus en plus parfaite et d'un encéphale de plus en plus volumineux ». Attention toutefois aux formulations qui suggèrent une finalité à l'évolution, l'homme n'en est pas l'aboutissement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les singes pourraient disparaître d'ici 25 à 50 ans

Selon une vaste étude, 75 % des primates accusent déjà un déclin.

Les singes sont nos plus proches cousins, et pourtant nous les regardons mourir à petit feu. Pis, nous les menons à leur perte, à un rythme et à une ampleur jamais égalés. Dans une étude publiée dans *Science Advances* mercredi 18 janvier, trente et un primatologues internationaux dressent un tableau alarmant : si rien n'est fait pour rapidement réduire les pressions humaines sur les primates et sur leur habitat, nous assisterons à des extinctions de masse de ces animaux emblématiques d'ici vingt-cinq à cinquante ans.

En combinant la liste rouge des espèces menacées de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), la littérature scientifique existante et des bases de données des Nations unies, Alejandro Estrada, de l'Université nationale autonome du Mexique, et ses collègues ont effectué une méta-analyse du statut, des menaces et des efforts de conservation des 504 espèces de primates au monde, des gorilles aux lémuriens en passant par les orangs-outans, les chimpanzés et autres bonobos.

Les résultats de cette étude, la plus vaste jamais conduite à ce jour, sont édifiants : les scientifiques estiment que 60 % des espèces de singes sont en danger d'extinction en raison d'activités humaines, et 75 % des populations accusent déjà un déclin. Quatre espèces de grands singes sur six ne sont plus qu'à un pas de la disparition, selon la dernière mise à jour de l'UICN, en septembre 2016. Or, ces animaux essentiels aux écosystèmes – ils contribuent au maintien et à la régénération des forêts en dispersant notamment des graines – jouent, en outre, un rôle central dans la culture, les traditions et même l'économie des territoires qu'ils occupent.

« La onzième heure »

Les primates, groupe de mammifères le plus riche en espèces après les rongeurs et les chauves-souris, se rencontrent dans quatre-vingt-dix pays d'Amérique latine, d'Afrique et d'Asie. Cependant, les deux tiers sont concentrés au cœur de quatre Etats seulement : le Brésil, Madagascar, l'Indonésie et la République démocratique du Congo. Si la grande majorité vit dans des forêts tropicales humides, les singes évoluent également dans les bois tempérés, les mangroves, les savanes, les prairies et même des déserts. Partout, leurs vies sont en danger : 87 % des espèces de Madagascar sont en péril, 73 % en Asie, 37 % en Afrique subsaharienne et 36 % en Amérique latine.

« C'est la onzième heure pour beaucoup de ces créatures, juge Paul Garber, professeur d'anthropologie à l'université de l'Illinois (Etats-Unis), qui a codirigé l'étude. *Plusieurs espèces comme le lémur à queue annelée, le colobe rouge d'Udzungwa, en Tanzanie, le rhinopithèque brun ou le gorille de Grauer ne comptent plus que quelques milliers d'individus. Dans le cas du gibbon de Hainan, en Chine, il reste moins de trente animaux. »*

En cause, des menaces multiples, dont le poids n'a cessé de s'accroître au fil des années, et qui souvent s'additionnent. Les habitats des singes disparaissent ainsi sous la pression de l'agriculture (qui affecte 76 % des espèces), de l'exploitation forestière (60 %), de l'élevage (31 %), de la construction routière et ferroviaire, des forages pétroliers et gaziers et de l'exploitation minière (de 2 % à 13 %). De plus, la chasse et le braconnage touchent directement 60 % des espèces. A quoi il faut encore ajouter des périls émergents, tels que la pollution et le changement climatique.

Première incriminée, la demande effrénée de produits agricoles (soja, huile de palme, sucre de canne, riz, etc.) et de viande a accéléré la déforestation aux quatre coins de la planète, ainsi que la fragmentation des habitats. Entre 1990 et 2010, les cultures ont progressé de 1,5 million de km² (trois fois la superficie de la France) dans les régions où vivent des primates, tandis que le couvert forestier reculait de 2 millions de km².

Une évolution fatale aux singes. La production d'huile de palme met ainsi gravement en péril les orangs-outans de Bornéo et de Sumatra, ces derniers ayant perdu 60 % de leur habitat entre 1985 et 2007. L'expansion des plantations de caoutchouc dans le sud-ouest de la Chine, elle, a provoqué la quasi-extinction du gibbon à joues pâles et du gibbon de Hainan. Et l'avenir n'incite guère à l'optimisme.

Les primatologues ont, de la même façon, quantifié l'impact des autres activités humaines sur nos parents quadrupèdes. Les chiffres donnent le tournis. L'expansion de l'agriculture industrialisée, de l'exploitation forestière, des mines ou de l'extraction d'hydrocarbures devrait accroître les routes et réseaux de transport de 25 millions de kilomètres d'ici à 2050 dans les zones de forêt tropicale. Le développement de douze méga barrages hydrauliques dans l'Etat de Sarawak, en Malaisie, pourrait

POURQUOI CET ARTICLE ?

Si notre espèce, *Homo sapiens*, a connu un récent essor démographique remarquable, il en va tout autrement pour nos parents les plus proches, à savoir les autres espèces de primates. **L'article proposé ici relate les conclusions de la plus vaste étude internationale jamais menée sur l'évolution des populations de primates à travers le monde**. Le constat est sans appel et alarmant : 60 % des espèces de primates sont en danger d'extinction et 75 % sont déjà en déclin. La mise en danger actuelle de nombreuses populations de primates résulte des activités humaines, en particulier des pressions qu'elles occasionnent sur l'habitat des primates. Le développement agricole et l'exploitation des ressources naturelles réduisent l'habitat des primates, qui sont aussi victimes de la chasse et du braconnage. L'étude relatée ici, tout en appelant à une véritable prise de conscience de la gravité de la situation, propose des pistes pour agir avant qu'il ne soit trop tard.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

entraîner la perte de 2 430 km² de couverture forestière, affectant les populations de gibbons de Müller, en voie de disparition.
Le commerce de singes, légal et illégal, est également pointé du doigt. Selon les données de la convention sur le commerce international des espèces menacées d'extinction, 450 000 de ces animaux ont été vendus vivants entre 2005 et 2014, et 11 000 supplémentaires en morceaux (corps, peaux, cheveux et crânes). Ces mammifères sont échangés pour la consommation de leur chair et l'utilisation des différentes parties de leur corps en médecine traditionnelle, comme talismans et trophées, pour la recherche biomédicale, les collections des zoos et enfin comme animaux de compagnie.

« Une révolution est nécessaire »

« Compte tenu de l'ampleur de leur déclin actuel et de l'augmentation à venir des pressions humaines, ni leur charisme ni leur statut d'espèces emblématiques ne seront suffisants pour préserver les primates de l'extinction, alerte Paul Garber. *Leur conservation nécessite une révolution urgente et majeure de nos actions, tant leur disparition est aujourd'hui ancrée dans l'incertitude politique, l'instabilité socio-économique, la criminalité organisée, la corruption et des choix de court terme. »*
« Nous alertons sur la situation des singes depuis des années, mais elle est bien plus grave que nous ne l'imaginions, déplore Russell A. Mittermeier, président du groupe de spécialistes des primates de l'UICN et l'un des auteurs de l'étude. *Pourtant, des efforts de conservation ont été réalisés de longue date : grâce à eux, l'ordre des primates n'a connu aucune extinction au cours du XXe siècle. Mais ces actions sont aujourd'hui insuffisantes. »*
Les auteurs proposent un modèle de protection à une échelle nationale, régionale et locale, tout en répondant aux besoins humains. Parmi les pistes évoquées, ils appellent à associer les populations à la gestion des forêts – leur source vitale de revenus –, à lutter contre leur pauvreté et à limiter la croissance démographique. *« Il s'agit de construire des économies locales fondées sur la préservation des arbres, en développant l'écotourisme autour des primates,* développe Paul Garber. *Et former les communautés, en particulier les décideurs et les jeunes, aux programmes de conservation. »*
La reforestation fait également partie des solutions, de même que l'expansion des zones protégées, qui constituent des sanctuaires à long terme. La réintroduction de certaines espèces a déjà fonctionné, notent les auteurs, à condition que les animaux soient nés dans la nature et non élevés en captivité. La poursuite de la recherche scientifique *in situ* est cruciale. Mais surtout, les primatologues appellent les populations à réduire leur empreinte écologique dans les régions où évoluent les primates.
La situation n'est pas perdue d'avance, estiment les chercheurs. *« Les gorilles de montagne, présents dans la région des Grands Lacs africains, sont les seules populations de grands singes en hausse. Nous devons encore faire preuve de prudence – il n'en reste que huit cent quatre-vingts –, mais cette réussite résulte de la collaboration, sur le long terme, entre les communautés et les autorités, avec l'aide des scientifiques,* assure Liz MacFie, du groupe de spécialistes des primates de l'UICN, qui n'a pas participé à l'étude. *Les gorilles sont maintenant perçus comme extrêmement précieux. Leur conservation profite à toutes les espèces qui dépendent des services rendus par les forêts, y compris les humains. »*

Audrey Garric, *Le Monde* daté du 20.01.2017

Quand plusieurs humanités peuplaient la Terre

L'« homme de Callao » trouvé sur l'île de Luçon porte à six les espèces du genre « Homo » qui ont été contemporaines de la nôtre.

Homo luzonensis vivait sur l'île de Luçon, aux Philippines, il y a plus de 50 000 ans. Cet « homme de Callao » s'ajoute à cinq espèces du genre *Homo* ayant, en Afrique, en Europe ou en Asie, été contemporaines de la nôtre, à des époques où l'humanité ne se réduisait pas au seul *Homo sapiens* et pouvait se conjuguer au pluriel.

« HOMO ERECTUS »

1,6 million d'années à 140 000 ans – Asie. Taille : 1,50 m à 1,65 m. Masse : 45 kg à 55 kg. Capacité crânienne : 900 à 1 200 cm³
Aiguillonné par la découverte de Neandertal (1856) et par l'évolution selon Darwin (1859), Charles Dubois, un anatomiste néerlandais, voulait découvrir le maillon intermédiaire entre l'homme et les grands singes. Ses fouilles à Java mirent au jour à partir de 1890 le pithécanthrope. La découverte de « l'homme de Pékin » (1921) conduisit au rapprochement des deux fossiles, sous l'appellation d'*Homo erectus*. Chasseur et cueilleur, il maîtrisait le feu et taillait des outils de pierre. Peut-être était-il aussi navigateur, s'il est bien l'ancêtre *d'Homo floresiensis* en Indonésie et d'*Homo luzonensis* aux Philippines ?

« HOMO NALEDI »

335 000 à 236 000 ans – Afrique du Sud. Taille : 1,50 m. Masse : 45 kg. Capacité crânienne : 465 cm3 à 560 cm³
Lorsque la découverte d'*Homo naledi* dans une grotte proche de

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Johannesburg (Afrique du Sud) a été annoncée en 2015, Lee Berger (université de Witwatersrand), responsable des fouilles, en aurait volontiers fait l'« ancêtre de l'humanité ». Depuis, la datation des quinze individus entassés au fond d'un boyau quasi inaccessible s'est affinée : environ 300 000 ans. Ses doigts recourbés en faisaient un bon grimpeur, capable de se servir d'outils, tandis que ses pieds et ses jambes étaient parfaitement adaptés à la marche. Lee Berger estime que le regroupement des fossiles pourrait témoigner de pratiques funéraires, mais l'hypothèse d'une mort accidentelle ne peut être écartée. Pour l'heure, aucun outil associé à *Homo naledi* n'a été retrouvé.

« HOMO FLORESIENSIS »

700 000 à 50 000 ans – Indonésie. Taille : 1,06 m. Masse : 16 kg à 28 kg. Capacité crânienne : 380 cm³

Découvert en 2003 dans une grotte de l'île indonésienne de Florès, qu'il aurait occupée entre - 100 000 et - 60 000 ans, le « Hobbit », ainsi surnommé en référence au héros de Tolkien, a longtemps eu un statut incertain. Sa taille minuscule a conduit certains à le considérer comme un *Homo sapiens* nain ou atteint de microcéphalie. En 2017, la description de fossiles assez proches, datés de 700 000 ans, a apporté un démenti : *Homo floresiensis* était là bien avant l'arrivée de notre espèce. Quant à son petit crâne, il ne semble pas l'avoir empêché d'être astucieux : les sites archéologiques sont jonchés de ses outils et il maîtrisait le feu…

« HOMO NEANDERTHALENSIS »

430 000 à 30 000 ans – Europe, Moyen-Orient, Asie centrale. Taille : 1,65 m (hommes), 1,55 m (femmes). Masse : 90 kg (hommes), 70 kg (femmes). Capacité crânienne : 1 500 cm³

On ne le présente plus, avec son front fuyant et sa réputation de brute. Pourtant, l'homme de Neandertal a fait preuve d'une ingéniosité certaine pour s'adapter aux rudes périodes de glaciation. Bien des questions demeurent sur ses pratiques culturelles et funéraires, sa maîtrise de la parole. Certains veulent le réhabiliter, quand d'autres voient plutôt en lui un imitateur d'*Homo sapiens*, moins doué que nous.

Ce qui est certain, c'est que nos deux espèces probablement issues d'un ancêtre commun qui vivait il y a 700 000 ans, étaient toujours interfécondes 600 000 ans plus tard, comme l'analyse du génome de Neandertal l'a prouvé : les populations non africaines actuelles comptent en moyenne 2 % d'ADN néandertalien. La paléogénomique tente de mieux nous définir par rapport à cet héritage.

« DENISOVA »

200 000 à 50 000 ans – Altaï (Sibérie), Asie. Taille, masse et capacités crâniennes inconnues

C'est une entité humaine en pointillé, définie d'abord par son ADN plutôt que par les caractéristiques anatomiques d'un fossile. Ce qui a permis d'identifier Denisova était une minuscule phalange, vieille de plus de 50 000 ans, trouvée en 2008 dans la grotte du même nom dans l'Altaï russe et attribuée à une jeune fille. Des vestiges plus anciens (200 000 ans) ont depuis été trouvés ainsi qu'un fragment osseux dont on a aussi pu tirer de l'ADN.

Nouvelle surprise, il s'agissait d'une métisse datant de 100 000 ans, dont la mère était une néandertalienne et le père un dénisovien. Notre espèce n'a pas échappé au charme dénisovien : on a retrouvé de 3 % à 5 % d'ADN dénisovien notamment chez des Papous, lointains descendants de ces amours antédiluviennes.

« HOMO SAPIENS »

315 000 ans – Maroc, reste du monde

Notre espèce réserve encore des surprises aux paléontologues. On a longtemps cru qu'elle était née il y a 100 000 ans en Afrique de l'Est et qu'elle avait entamé sa conquête de la planète il y a environ 60 000 ans. Mais la découverte au Maroc de fossiles de *Sapiens* vieux de 315 000 ans, annoncée en juin 2017, a vieilli de 100 000 ans le registre fossile pour notre espèce. Et plaide pour son origine « panafricaine ». La découverte sur le mont Carmel en Israël d'une demi-mâchoire vieille de 180 000 ans, annoncée début 2018, montre que *Homo sapiens* était prêt à conquérir la planète bien plus tôt qu'on ne l'avait imaginé.

Hervé Morin, *Le Monde* daté du 12.04.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article relate la découverte d'une nouvelle espèce d'Homo, Homo luzonensis, mise à jour dans une grotte de Luçon, la plus grande île des Philippines. Au total, 13 restes fossiles appartenant à 3 individus ont été découverts lors de plusieurs campagnes de fouilles depuis 2007. Cette espèce nouvellement décrite d'*Homo*, datée d'environ 50 000 ans, présente un mélange étonnant de caractères archaïques et de caractères modernes. La découverte de cette septième espèce d'*Homo* contribue à modifier la conception de l'évolution du genre *Homo*. Le genre *Homo* ne présente pas une évolution linéaire avec une succession d'espèces mais regroupe des espèces variées, qui présentent des évolutions plus ou moins divergentes. On peut supposer que l'évolution spécifique d'*Homo luzonensis* est en partie liée à son existence au sein d'une île, avant qu'il ne soit définitivement remplacé par *Homo sapiens*.

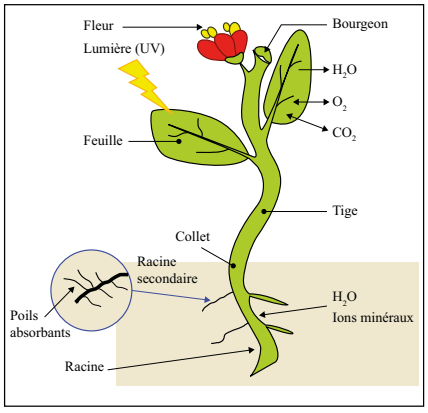
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes

À la différence des animaux – qui sont généralement mobiles dans leur environnement, ce qui leur permet de chercher leur nourriture, de se protéger des agressions de l'environnement, d'échapper à leurs prédateurs et de se reproduire –, la plante est constituée de racines ancrées dans le sol portant des tiges feuillées qui se développent en milieu aérien. Comment l'organisation des plantes à fleurs est-elle adaptée à leur mode de vie fixé à l'interface entre le sol et l'atmosphère ?

Les échanges entre la plante et son milieu

La plante réalise des échanges d'énergie et de matière avec son milieu de vie à travers **des surfaces d'échanges externes** très développées, en lien avec son mode de vie fixé. La partie souterraine de la plante est constituée de **l'appareil racinaire,** qui assure l'ancrage du végétal dans le sol et l'absorption de l'eau et des ions minéraux du sol pour permettre la photosynthèse. Les racines des plantes présentent des structures spécialisées dans l'absorption : **les poils absorbants**. Un poil absorbant est formé d'une cellule très allongée de l'épiderme racinaire. L'ensemble des poils absorbants de la plante constituent une surface d'échange importante entre la plante et le sol.



L'organisation d'une plante à fleur et les échanges avec son milieu

Les feuilles, portées par les tiges, sont majoritairement formées de cellules chlorophylliennes, contenant des chloroplastes. Ces organites captent la lumière et synthétisent, à partir du dioxyde de carbone et de l'eau, des molécules organiques lors de **la photosynthèse**. Les **feuilles** constituent alors une vaste surface d'échange avec l'atmosphère. Les échanges de molécules gazeuses de CO_2, d'O_2 et d'H_2O entre les feuilles et l'atmosphère s'effectuent au niveau **des stomates,** dont l'orifice – l'ostiole – peut être ouvert ou fermé. Les feuilles sont également responsables de la capture de l'énergie lumineuse. Ainsi l'organisation fonctionnelle des plantes présente d'importantes surfaces d'échanges en relation avec leur mode de vie fixé. De plus la croissance continue des plantes participe à augmenter les possibilités d'échanges entre la plante et son milieu.

La circulation de matière au sein de la plante

Dans la plante, des échanges de matières sont indispensables entre les parties souterraines (lieu de l'absorption des ions minéraux et de l'eau) et les parties aériennes (lieu d'exposition à la lumière, d'échanges des molécules gazeuses et de production de molécules organiques). Ces échanges de matières dans la plante ont lieu dans deux réseaux distincts de vaisseaux conducteurs. **Le xylème** transporte la **sève brute**, composée d'eau et d'ions minéraux, des racines vers le reste de la plante. **Le phloème transporte la sève élaborée, riche en molécules organiques synthétisées par la plante, des organes chlorophylliens producteurs, dont les feuilles, vers les autres organes consommateurs de la plante (les racines mais aussi les organes comme les fruits, les tubercules, etc.).**

MOTS CLÉS

DISSÉMINATION

Transport des graines ou des fruits contenant des graines permettant le développement d'une nouvelle plante à partir d'une graine. Les principaux agents disséminateurs sont le vent, l'eau et les animaux. La dissémination assure le maintien de l'aire de répartition de la plante mais également son extension.

PLANTE

Végétal terrestre dont les racines et les tiges feuillées sont reliées par des tissus conducteurs (le xylème et le phloème transportant respectivement la sève brute et la sève élaborée). Parmi les plantes, on distingue notamment les plantes à fleurs, ou Angiospermes, et les plantes sans fleurs, contenant en particulier les Pinophytes (pins, sapins).

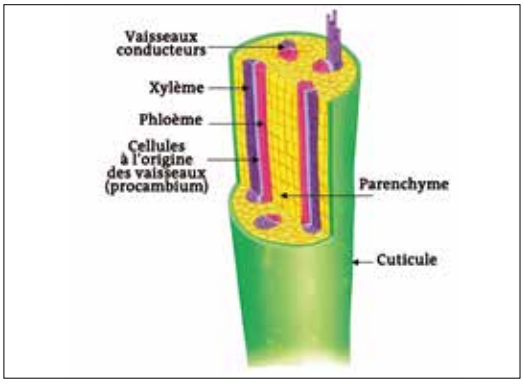
POLLINISATION

Transport des grains de pollen des étamines jusqu'au pistil d'une fleur. Les principaux vecteurs de transport du pollen sont le vent, l'eau et les animaux.

STOMATE

Structure située au niveau de l'épiderme des feuilles, principalement sur la face inférieure de ces dernières, qui permet les échanges de gaz (CO_2, O_2 et H_2O) entre les feuilles et l'atmosphère. Un stomate est constitué de deux cellules épidermiques spécialisées, les cellules stomatiques, encadrant un orifice, l'ostiole. L'ouverture de l'ostiole permet le passage des gaz entre l'atmosphère et la cavité située sous l'ostiole, la chambre sous-stomatique. Cette dernière est le lieu d'échanges gazeux entre l'air et les cellules chlorophylliennes environnantes, comme les cellules du parenchyme lacuneux. Les plantes ont la capacité de réguler l'ouverture de leurs stomates en fonction des conditions climatiques, ce qui leur permet de contrôler la perte d'eau au niveau des feuilles.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Coupe longitudinale de tige montrant les vaisseaux conducteurs

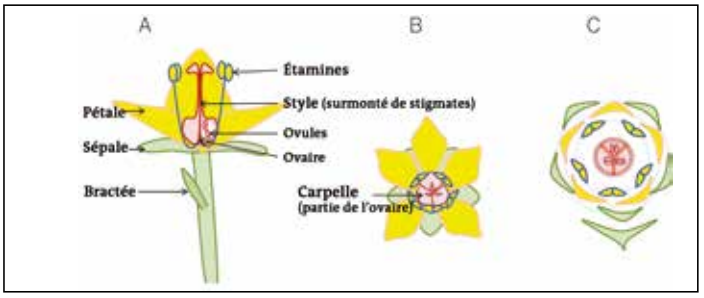
Les mécanismes de défense des plantes

Les plantes présentent une grande variété de défense **contre les agressions du milieu**. Elles sont capables de résister aux **variations saisonnières**. Par exemple, les arbres des régions tempérées résistent au froid de l'hiver en perdant leurs feuilles et en protégeant leurs bourgeons sous des écailles protectrices. Les plantes annuelles passent la saison froide sous forme de graines qui assurent la reprise de la végétation aux beaux jours. Chez les plantes adaptées au climat méditerranéen, la présence de poils et de cuticule épaisse au niveau des feuilles limite les risques de déshydratation en été. Les plantes présentent également des mécanismes de défense **contre leurs prédateurs** : des piquants (comme les cactus), des feuilles épineuses (comme le chardon). Certaines plantes synthétisent des toxines les rendant impropres à la consommation. Ainsi, la consommation, par les antilopes, de feuilles d'acacias entraîne une augmentation de la production de tanins au niveau des feuilles, qui limite le broutage de ces herbivores. Enfin, certaines plantes sont même capables d'émettre des signaux attirant des insectes parasites de leurs prédateurs. C'est le cas de la vesce des champs, qui produit du nectar attirant des fourmis, lesquelles attaquent les acariens et les insectes herbivores qui sont ses prédateurs.

La reproduction des plantes à fleur

Les fleurs sont constituées de différentes pièces florales, situées sur des cercles concentriques, appelés verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur de la fleur se trouvent **les sépales, les pétales, les étamines et le pistil**. La mise en place des verticilles est sous le contrôle de gènes du développement floral. Les étamines et le pistil constituent les organes reproducteurs de la plante. Le pistil, renfermant les ovules contenant les gamètes femelles, forme **l'organe reproducteur femelle**.
Les étamines, qui abritent les grains de pollen contenant les gamètes mâles, forment **l'organe reproducteur mâle**.

La plupart des fécondations chez les plantes sont croisées : elles ont lieu entre deux gamètes provenant de deux individus différents de la même espèce. Dans ce cas, le mode de vie fixé des plantes impose un transport du pollen appelé **pollinisation**. La pollinisation peut être effectuée par **le vent** (anémogamie), **l'eau** (hydrogamie) ou **des animaux** (zoogamie), majoritairement des insectes. Dans le cas d'une collaboration entre un animal pollinisateur et la fleur, des adaptations souvent très étroites entre ces derniers sont observées. Par sa couleur, sa forme, la sécrétion de nectar ou encore son parfum, la fleur attire spécifiquement l'animal capable de la polliniser. L'animal pollinisateur présente des adaptations morphologiques à l'accrochage du pollen. Ces adaptations sont le résultat d'**une coévolution** entre l'insecte pollinisateur et la plante à fleur.



L'organisation de la fleur : A : coupe transversale d'une fleur ; B : vue de dessus ; C : diagramme floral

Après la fécondation des ovules contenus dans le pistil par les gamètes mâles des grains de pollen, les ovules fécondés se transforment en **graines,** tandis que la fleur se transforme en **fruit**.
De par le mode de vie fixée de la plante, les graines sont responsables de **la dispersion de l'espèce** et de **la colonisation de nouveaux milieux**. Les graines ou les fruits contenant les graines sont disséminés par **le vent**, **l'eau** ou encore **les animaux** qui les transportent accrochés à leur corps ou en les consommant et en les rejetant dans le milieu par leurs excréments. Là aussi, il peut y avoir une collaboration étroite entre l'animal disséminateur et la plante, suite à une **coévolution.**

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- **Les fleurs, un parfum de mystère** p. 34-35
(Florence Rosier, *Le Monde* daté du 02.05.2018)
- **Haro scientifique mondial sur les néonicotinoïdes** p. 36
(Stéphane Foucart, *Le Monde* daté du 04.06.2018)

ZOOM SUR...

LE SEXE DES PLANTES

La majorité des plantes portent des fleurs hermaphrodites ou bisexuées, contenant à la fois un organe reproducteur mâle, les étamines, et un organe reproducteur femelle, le pistil. Mais chez certaines espèces dites « monoïques », comme le maïs, un individu porte des fleurs unisexuées, c'est-à-dire des fleurs mâles (avec des étamines mais sans pistil) et des fleurs femelles (avec un pistil mais sans étamines) sur un même pied. Enfin, chez les espèces dioïques, comme le saule, chaque individu ne porte qu'un type de fleurs unisexuées, soit mâles soit femelles.

AUTOFÉCONDATION ET FÉCONDATION CROISÉE

Chez certaines espèces comme le blé, il peut y avoir autofécondation. L'autofécondation, impossible chez les espèces dioïques, a lieu entre un grain de pollen et l'ovule, issus d'un même individu. Cette autofécondation peut entraîner une homozygotie (présence de deux allèles identiques pour un gène donné) importante chez les descendants et réduire ainsi les possibilités d'adaptation des individus aux variations des conditions de l'environnement. Chez de nombreuses espèces monoïques ou hermaphrodites, l'autofécondation est rendue impossible par des barrières morphologiques (chez les orchidées, une structure anatomique, le rostre, sépare le pistil des étamines), temporelle (les étamines et le pistil n'atteignent pas leur maturité en même temps, comme chez le maïs, où le pollen est émis alors que le pistil n'est pas encore réceptif) ou, le plus souvent, génétique (des mécanismes d'incompatibilité génétique rendant impossible l'autofécondation chez de nombreuses espèces).
La fécondation croisée, qui a lieu entre deux fleurs situées sur deux plantes différentes d'une même espèce, est donc courante chez les plantes et présente l'avantage d'être à l'origine d'une diversité génétique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.2 : La culture en Europe de yuccas originaires d'Amérique

L'intitulé complet du sujet

Les yuccas sont des plantes originaires du continent américain. Dans leurs pays d'origine, les pieds portent de nombreux fruits charnus, généralement comestibles. Un horticulteur installé en région parisienne a le projet de cultiver des yuccas destinés à la production de fruits qui seront commercialisés sous forme de préparations culinaires et cosmétiques. Dans un premier temps, il prévoit la mise en culture de nombreux individus, afin de sélectionner, par des croisements, les pieds produisant les fruits avec les qualités requises. Ensuite viendra la production en masse des fruits.

On vous demande de poser un regard critique sur le projet de l'horticulteur. Montrez que le projet est techniquement réalisable à condition de respecter certaines contraintes (que vous préciserez) et de prendre en compte les conséquences éventuelles sur la biodiversité.

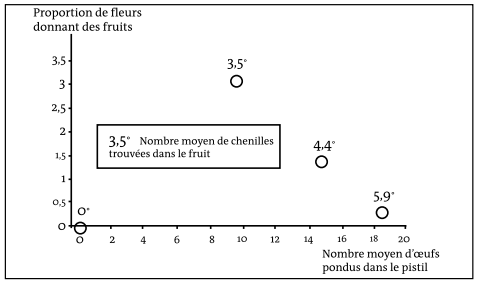
Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Les documents

Document 1 : La reproduction sexuée chez les yuccas

Dans leurs contrées d'origine, la fécondation des yuccas est réalisée par des espèces de papillons absentes en Europe. Certaines espèces de yuccas ont été importées avec succès en Europe dès le milieu du XIX^{e} siècle. Elles poussent sans difficulté dans les jardins ou en pots dans la plupart des régions. Parmi elles, le yucca glauque est sans doute le plus robuste car il supporte des gels sévères de l'ordre de -20° C, voire beaucoup moins. En Europe, les yuccas portent des fleurs mais ne donnent jamais de fruits. Ils se reproduisent uniquement par multiplication végétative.

Document 2 : Influence de l'insecte teigne du yucca *(Tegeticula yuccasella)* sur la production de fruits par les yuccas glauques en Alberta (États-Unis)



Source : rapport du COSEPAC, Canada, 2002

Document 3 : Yucca glauque *(Yucca glauca)* et teigne du yucca *(Tegeticula yuccasella)*, deux espèces en voie de disparition ?

La teigne du yucca et le yucca glauque
Nom : teigne du yucca (*Tegeticula yuccasella*) et yucca glauque (*Yucca glauca*)
Description : La teigne du yucca est un petit papillon au corps brun et à la tête blanche, dont l'envergure des ailes varie de 18 à 28 mm.
Le yucca glauque est une grande plante vivace qui peut atteindre une hauteur de 100 cm et qui produit une grappe de fleurs blanches à son extrémité.
Habitat : Alberta
Situation actuelle : La teigne du yucca est en voie de disparition (exposée à une disparition imminente de la planète ou du pays). Le yucca glauque est une espèce menacée (elle pourrait être en voie de disparition si aucune mesure n'est prise pour enrayer les facteurs susceptibles de la faire disparaître de la planète ou du pays).
Mesures de rétablissement : Ces deux espèces sont interdépendantes, chacune ayant besoin de l'autre pour survivre. La teigne du yucca se nourrit exclusivement de graine de yucca glauque, qui ne sont produites que lorsque la plante est pollinisée par les teignes adultes.

Source : site du ministère de l'Écologie canadien

Document 4 : Pollinisation du *Yucca aloifolia* par l'insecte *Pronuba yucasella*

Dessins extraits de *The Popular Science Monthly*, Edouard L. Youmans, 1882

Femelle de *Pronuba yuccasella* en train de pondre dans le pistil de la fleur de yucca

ZOOM SUR...

LES SURFACES D'ÉCHANGES DES VÉGÉTAUX

Le mode de vie fixé de la plante et la pauvreté de son milieu de vie (eau et ions en faible quantité dans le sol, CO_2 peu abondant dans l'atmosphère) donnent lieu au développement de vastes surfaces d'échanges. La surface moyenne d'échange de nutriments, d'eau et d'ions minéraux d'un animal rapportée à la masse de l'animal est d'environ 3 m²/kg, alors qu'un végétal développe une surface d'échange d'eau et d'ions rapportée à la masse du végétal de plusieurs centaines de m² /kg.

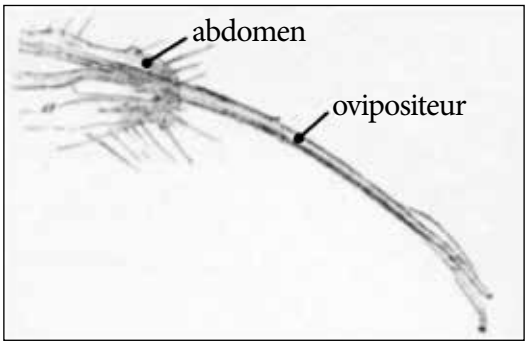
LES ASSOCIATIONS SYMBIOTIQUES DES RACINES

Chez de nombreuses plantes, la surface d'absorption racinaire est fortement augmentée grâce à une symbiose avec des champignons : les mycorhizes. Ces champignons fournissent la plante en éléments de la solution du sol, comme les phosphates, tandis que la plante fournit les champignons en glucides. Chez certaines plantes comme les Fabacées, une symbiose existe avec des bactéries situées au niveau de nodosités racinaires. Ces bactéries du genre *Rhizobium* sont capables de fixer le diazote de l'air et de fournir des composés azotés à la plante, qui, en échange, la nourrit en molécules carbonées, comme des glucides.

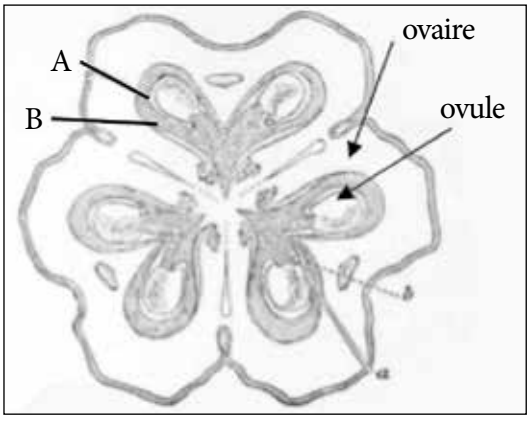
LES GÈNES DE DÉVELOPPEMENT FLORAL

L'existence de plantes mutantes présentant des anomalies du développement floral montre que celui-ci est sous le contrôle de gènes de développement. Ainsi, chez *Arabidospsis thaliana*, plante très étudiée en laboratoire, une mutation dans le gène Agamous entraîne des fleurs dont le pistil et les étamines sont remplacés par des pétales. Une mutation dans le gène Apetala est à l'origine de fleurs sans pétales.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Pièces génitales de *Pronuba yuccasella*
Extrémité de l'abdomen prolongée par un ovipositeur, organe spécialisé permettant de pondre les œufs directement dans les ovaires, au contact de l'ovule



Coupe transversale dans le pistil de la fleur de yucca
A : emplacement de l'ovipositeur ; B : position des œufs

Proposition de corrigé

Une contrainte : l'interdépendance entre les yuccas et leur insecte pollinisateur

Les yuccas originaires du continent américain et cultivés en Europe ne portent pas de fruits, car les espèces d'insectes responsables de leur pollinisation sont absentes (document 1). En effet, le yucca glauque est inféodé à une pollinisation effectuée par un insecte particulier, la teigne du yucca. Cet insecte ne se nourrit que des fruits de cette plante, qui ne sont produits que lors la pollinisation effectuée par les teignes du yucca adultes (document 3). En effet, en absence d'œufs de teigne présents dans le pistil des fleurs de yucca, c'est-à-dire en absence de teignes adultes ayant pondu, les yuccas glauques ne produisent aucun fruit. En revanche, en présence de teignes de yucca, une quantité optimale d'œufs pondus dans le pistil correspond à un nombre maximal de fruits formés (document 2). Une autre espèce de yucca, le *Yucca aloifolia*, dépend pour sa pollinisation d'une autre espèce d'insecte appelée *Pronuba yucasella*. Cet insecte présente un organe spécialisé à l'extrémité de l'abdomen, l'ovipositeur, lui permettant de pondre ses œufs directement dans les ovaires de la fleur du *Yucca aloifolia* (document 4). Ainsi la coévolution a abouti à des spécialisations anatomiques poussées de l'insecte pollinisateur (forme de l'ovopositeur) et de la plante (forme de l'ovaire), d'où une forte interdépendance. Comment l'horticulteur peut-il réaliser la pollinisation des yuccas en Europe pour réaliser la fécondation et obtenir des fruits ? Il peut envisager d'introduire les insectes pollinisateurs dédiés aux espèces de yuccas choisies. Il devra veiller à équilibrer les populations de pollinisateurs et de yuccas pour optimiser son rendement en fruits. Mais l'horticulteur peut également envisager un mode très différent de pollinisation, lui évitant de faire appel aux insectes pollinisateurs inféodés aux yuccas : il peut recourir à la pollinisation manuelle, comme dans la culture de la vanille.

Une autre contrainte : les conditions climatiques

L'horticulteur doit choisir ses espèces de yuccas en tenant compte des conditions climatiques, pour réussir leur adaptation à leur nouvel environnement : par exemple, le yucca glauque est capable de supporter des gels sévères (document 1).

Des contraintes écologiques liées à l'introduction de nouvelles espèces

L'introduction de nouveaux insectes peut présenter des conséquences écologiques : les espèces ainsi introduites peuvent se révéler invasives et déséquilibrer les écosystèmes environnants. Pour protéger les écosystèmes existants, l'horticulteur peut envisager le confinement des espèces nouvelles. D'un autre côté, ces introductions pourraient contribuer à sauver des espèces en danger : la teigne du yucca glauque est en voie de disparition et le yucca glauque est menacé (document 3). Dans tous les cas, les solutions techniques retenues et commercialement viables doivent s'accompagner d'une étude rigoureuse de leurs impacts écologiques.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Analyser de manière intégrale les documents dans l'ordre donné, sans dégager les contraintes techniques pour l'horticulteur et les conséquences écologiques.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.2 : Études de documents

– Les liens entre la morphologie et l'anatomie de la plante et son mode de vie fixée à l'interface entre le sol et l'atmosphère.
– La lutte contre les prédateurs et les variations des conditions du milieu.
– Les modalités de la pollinisation et de la dispersion des graines ou des fruits.

ZOOM SUR…

LA COÉVOLUTION

La coévolution se définit comme l'évolution coordonnée de deux espèces en relation étroite l'une avec l'autre.

Il existe une véritable collaboration entre les animaux pollinisateurs et la plante à laquelle ils sont souvent inféodés. Par exemple, certains papillons pollinisateurs présentent un organe de succion extrêmement long et effilé, qui s'adapte exactement à l'éperon nectarifère formé par le pétale de l'orchidée qu'ils pollinisent. Grâce à cet organe de succion, les papillons récoltent le nectar situé au fond de l'éperon nectarifère et se chargent en pollen, qu'ils vont emporter vers d'autres fleurs de la même espèce. Il s'agit par exemple de l'orchidée *Angraecum sesquipedale*, que l'on trouve à Madagascar et qui est pollinisée par le papillon *Xanthopan morgani praedicta*.

FRUIT OU LÉGUME ?

Les haricots verts sont des légumes, mais le concombre, la tomate, la courgette… sont des fruits !

Dans le langage courant est appelé « légume » tout aliment végétal accompagnant un plat au cours d'un repas. Mais en botanique le terme « légume » désigne uniquement la gousse formée par le fruit d'une famille de plantes à laquelle appartiennent le pois, les haricots, la lentille, etc., que l'on appelle parfois les « légumineuses ». Ainsi, en appliquant ces définitions botaniques, de nombreux « légumes » consommés comme le concombre, la tomate, la courgette sont en fait des fruits car ils proviennent du développement de l'ovaire de la fleur après fécondation. D'autres « légumes », comme les pois et les lentilles, sont en fait des graines. Et de nombreuses autres parties végétales sont également utilisées pour l'alimentation : des racines (la carotte), des tiges modifiées en organes de réserve (les pommes de terre), etc.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les fleurs, un parfum de mystère

Tardivement apparues dans l'histoire évolutive, les plantes à fleurs ont conquis la planète en un temps record. Retour sur un prodigieux succès, qui nous conduit à voir d'un autre œil ces « fausses ingénues ».

L'émerveillement renaît chaque année, quand la nature se revêt de vert tendre et se pare de fleurs. Et le printemps réveille ces questions : comment naissent les fleurs ? D'où viennent les forces obscures à l'œuvre dans la sève, lorsque les jours rallongent ? La science des fleurs bénéficie d'un bouquet de découvertes récentes. *« C'est un domaine très dynamique »*, se réjouit François Parcy, expert en biologie végétale dans une équipe CNRS-INRA-CEA, à l'université Grenoble-Alpes.

Les fleurs, fragiles objets pour doux rêveurs ? Détrompez-vous. Ce sont de redoutables séductrices c'est même leur mission. Si les plantes exhibent ces parures, c'est bien pour attirer insectes et autres pollinisateurs qui favorisent leur reproduction et leur dissémination. Les faits sont là : sous leur air enjôleur, ces fausses ingénues ont si bien servi l'intérêt des « plantes à fleurs » que celles-ci dominent aujourd'hui à plus de 90 % le monde végétal. Sans doute ont-elles ainsi favorisé la survie et l'expansion de notre espèce. *« Tous nos aliments d'origine végétale – fruits, légumes, graines – proviennent des plantes à fleurs »*, souligne François Parcy.

Grâce et pesanteur du pouvoir des fleurs, quand elles déplient leurs corolles et déploient leurs couleurs ! *« La plupart* [des fleurs] *ont recours à des ruses, à des combinaisons, à une machinerie, à des pièges, qui, sous le rapport de la mécanique, de la balistique, de l'aviation, de l'observation des insectes, par exemple, précédèrent souvent les inventions et les connaissances de l'homme »*, écrivait l'écrivain belge Maurice Maeterlinck (1862-1949), Prix Nobel de littérature, dans son ouvrage *L'Intelligence des fleurs*, publié en 1907.

« Ruses », « inventions », « intelligence » des plantes à fleurs ? Disons-le tout net : c'est de l'anthropomorphisme assumé. *« Il faut être prudent avec le terme "intelligence",* soupire Charlie Scutt, du CNRS à l'ENS-Lyon. *C'est l'évolution, en réalité, qui a peaufiné des systèmes biologiques, en réponse à des problèmes précis. La plante n'est pas consciente de l'insecte qui la pollinise, par exemple. Parlerait-on de "l'intelligence" d'un système de régulation du glucose dans le sang, chez l'animal ? »*

Revenons à la naissance des fleurs. La question est double. Comment les fleurs sont-elles apparues au cours de l'évolution ? Et comment se développent-elles sur la tige ?

Pour Darwin, la première question était un « abominable mystère ». Pour le comprendre, il faut remonter aux premières plantes terrestres : des mousses, apparues il y a 450 millions d'années. Ensuite sont venues les fougères, il y a 420 millions d'années. Puis une rupture a lieu, il y a 350 millions d'années : l'ère des « plantes à graines » a sonné. Ces plantes ont inventé un mode de reproduction qui produit des graines, indépendamment du milieu aqueux. *« Cette super-innovation leur a permis de résister à la sécheresse et au froid »*, relève François Parcy. La pollinisation se fait par le vent. Ces plantes sont nommées « gymnospermes » – du grec *sperma* « graines » et *gymno* « nu ».

La plupart des gymnospermes actuels sont des conifères : sapins, pins, mélèzes, cyprès... Elles disposent de « cônes » tantôt mâles, tantôt femelles. La pomme de pin est l'exemple type d'un cône femelle ; les ovules y sont logés à la base des écailles, disposées en spirales.

Ensuite se produit le « saut évolutif » qui fascinera Darwin. *« Un beau jour, des plantes ont inventé un objet extraordinaire : la fleur. »* C'était il y a plus de 140 millions d'années, à la fin du jurassique ou au début du crétacé mais cette date prête encore à débat. A cette époque, la Terre est dominée par les dinosaures. Les insectes sont déjà là. Les oiseaux apparaissent. Rares sont encore les mammifères et guère plus gros qu'une souris. L'air est chargé en gaz carbonique, dont le taux va bientôt diminuer.

Ce fut une vraie rupture, car l'architecture des fleurs différait radicalement de celle des cônes. *« Une fleur possède quatre couronnes d'organes. Ce sont, de la périphérie vers le centre : les sépales, les pétales, les étamines et le carpelle (ou pistil) »*, résume François Parcy. Sépales et pétales jouent un rôle protecteur et attracteur d'insectes. L'étamine est l'organe mâle qui porte le pollen. Le pistil est l'organe femelle qui enferme les ovules. D'où le nom scientifique des plantes à fleurs : des « angiospermes », du grec *sperma* « graines » et *angeion*, « récipient ».

« L'abominable mystère », en réalité, est une triple énigme. Comment les plantes à fleurs sont-elles si soudainement apparues ? Deux cents millions d'années se seraient écoulées entre l'apparition des gymnospermes et celle des angiospermes : que s'est-il passé durant ce long tunnel ? *« On n'a pas trouvé d'intermédiaires entre les gymnospermes et les angiospermes, ni dans les fossiles ni dans les plantes vivantes »*, s'étonne François Parcy. Ensuite, comment les plantes à fleurs se sont-elles si rapidement diversifiées ? Enfin, comment expliquer leur succès évolutif ? Les angiospermes regroupent aujourd'hui 300 000 à 350 000 espèces. Ecrasante domination ! Seuls les milieux les plus froids échappent à leur emprise. En comparaison, les gymnospermes ne comptent que 800 à 1 000 espèces.

Nénuphar blanc

Une série de travaux récents éclaire ce mystère – sans le résoudre pourtant. En août 2017, une étude publiée dans la revue *Nature Communications* a fait grand bruit. Elle dressait le portrait-robot de la toute première plante à fleurs. Des équipes de 13 pays, coordonnées par Hervé Sauquet, alors au CNRS à l'université Paris-Sud, ont comparé les traits morphologiques des plus anciennes fleurs actuelles (nénuphar, magnolia, lys...). Résultat : cette fleur ancestrale, hermaphrodite (comme la plupart des fleurs actuelles), aurait présenté plusieurs cercles concentriques d'organes ressemblant à des pétales, organisés par groupes de trois ; au centre, les pistils auraient été disposés en spirale. Son dessin évoque une sorte de nénuphar blanc.

Un peu plus tôt, en mars 2017, était paru le portrait du génome du plus récent ancêtre commun des plantes à fleurs. Un travail publié dans Nature Genetics par l'équipe de Jérôme Salse (Inra-CNRS, université de Clermont-Ferrand). Les chercheurs ont comparé les génomes de diverses plantes à fleurs actuelles. Selon leur travail, les premières plantes à fleurs seraient apparues bien plus tôt que prévu, il y a 214 millions d'années.

« La validité de cette date reste débattue. Il n'empêche : ce fut un premier coup de pied dans la fourmilière », commente François Parcy. D'autant que, en février, une étude anglaise est venue renforcer le doute. *« Selon cette étude, les plantes à fleurs seraient apparues dans une très large fourchette de temps, comprise entre – 256 et – 149 millions d'années »*, résume Charlie Scutt.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Là encore, cette analyse ne fait pas l'unanimité. *« Pour moi*, estime Charlie Scutt, *le dernier ancêtre commun des plantes à fleurs vivantes date d'il y a 160* millions *d'années. C'est cohérent avec ce que l'on sait des plus anciens pollens d'angiospermes, découverts en Israël, au Maroc, au Royaume-Uni* : *ils datent d'il y a 141* millions *d'années. »*

A quoi attribuer le fabuleux succès des plantes à fleurs ? Leur bisexualité, bien sûr, a été un puissant moteur. La fleur rassemble, sur une même structure, les organes mâles et femelles, très proches. *« C'est une invention géniale pour faciliter la reproduction,* s'enthousiasme François Parcy. *Elle a permis les interactions de ces plantes avec les insectes pollinisateurs. »*

Angiospermes et gymnospermes

Des facteurs génétiques ont sans doute aussi joué. Les premiers angiospermes possédaient des génomes de taille réduite (aujourd'hui, ils ont des génomes de toutes tailles). Leur succès évolutif serait lié à ce petit génome. C'est du moins l'hypothèse de deux auteurs américains, qui ont publié leurs réflexions dans *Plos Biology* le 11 janvier. Les gymnospermes, eux, étaient dotés de très grands génomes. Un petit génome aurait accru l'efficacité de la photosynthèse en diminuant la taille des cellules. Le transport du gaz carbonique aurait été plus efficace : ces plantes auraient mieux supporté la baisse du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère.

En outre, les angiospermes ont acquis de nombreux gènes en double exemplaire : *« Une chance énorme, au plan évolutif »*, estime François Parcy. Car l'une des deux copies d'un gène pouvait assurer les fonctions vitales des cellules, tandis que l'autre était libre d'évoluer, d'innover, d'inventer de nouvelles structures ou fonctions…

Et enfin, il aurait permis un cycle de vie plus rapide : *« Les premiers angiospermes auraient ainsi mieux résisté à la prédation des dinosaures herbivores »*, rapporte Charlie Scutt.

Vous fatiguez ? Ecoutez ceci : *« L'heure magnifique appartient aux roses de mai. Alors, à perte de vue, du penchant des coteaux aux creux des plaines, entre des digues de vignes et d'oliviers, elles coulent de toutes parts comme un fleuve de pétales d'où émergent les maisons et les arbres, un fleuve de la couleur que nous donnons à la jeunesse, à la santé et à la joie »*, écrit Maurice Maeterlinck.

Comment cette *« heure magnifique »* est-elle possible ? Autrement dit, comment naît une fleur sur sa tige ? Fin de la parenthèse poétique. La fleur se forme à partir de cellules souches groupées dans un réservoir, le « méristème ». La floraison découle d'un cocktail de signaux lumineux, génétiques, épigénétiques, hormonaux et mécaniques.

Sur le plan génétique, la formation des organes floraux obéit à un modèle simple : le « modèle ABC ». Il figure désormais dans tous les manuels de SVT de terminale. Décrit en 1988, il dérive d'études menées chez des mutants d'*Arabidopis thaliana* et de la gueule-de-loup.

Ce modèle fait intervenir trois gènes bâtisseurs de fleurs, les gènes A, B et C. C'est leur combinaison, dans les cellules du bourgeon floral, qui détermine l'identité des organes floraux. Les sépales se forment quand seul le gène A s'exprime. Le pistil, quand seul le gène C s'exprime. Les pétales, quand A et B sont coexprimés. Et l'étamine, quand ce sont C et B.

« Cascade hiérarchique de gènes »

« Un beau jour, un gène-architecte nommé "leafy" ["feuillu"] *s'active. Il déclenche la formation du bourgeon floral. Comment ? En orchestrant une cascade hiérarchique de gènes* [via les gènes A, B, C]*, dans un ordre chronologique précis »*, raconte François Parcy. Et la fleur éclôt au sommet de sa tige, petit miracle de grâce.

Bouclons maintenant la boucle : comment cette cascade est-elle apparue, au cours de l'histoire des plantes ? L'équipe de François Parcy s'est intéressée à une bizarrerie de la nature : *Welwitschia mirabilis*. Cet E.T. végétal, une plante informe qui peut vivre deux mille ans, et pousse dans les déserts de Namibie et d'Angola. Comme tous les gymnospermes, elle possède des cônes mâles et femelles séparés. Mais ses cônes mâles possèdent quelques ovules stériles, *« comme si cette plante avait fait une tentative avortée d'inventer une fleur bisexuelle »*, s'amuse François Parcy. Il a montré que ce gymnosperme possède un équipement génétique similaire à celui qui dirige la formation des fleurs, organisé selon la même hiérarchie. *« L'abominable mystère de Darwin n'*était peut-être pas si abominable ! *Les gymnospermes étaient déjà outillés pour produire une partie de ce qui deviendra la fleur chez leurs descendants »*, relève le chercheur. Comme souvent, la nature aurait recyclé, produisant du neuf avec du vieux.

A l'Institut Weizmann, en Israël, l'équipe d'Avraham Levy creuse une autre question : comment les plantes à fleurs réparent-elles une cassure de l'ADN ? Vous trouvez cela sans rapport avec les fleurs ? Eh bien non. Car pour répondre, les chercheurs ont fait « blanchir » des fleurs de tomate, habituellement jaunes. Ils ont utilisé le « couteau suisse à ADN », le fameux Crispr-Cas9, pour créer une cassure dans un gène de la tomate. *« Les cellules végétales ont pu réparer ces cassures en se calquant sur le chromosome homologue »*, indique le chercheur.

« Pour moi, ces ciseaux moléculaires seraient l'outil idéal pour l'amélioration des fleurs, estime Avraham Levy. *Ils pourraient permettre de manipuler à loisir, de façon propre, les voies de leurs pigments ou de leurs parfums. »*

De quoi relancer une vive controverse, de part et d'autre de l'Atlantique. Car les plantes obtenues à partir de Crispr-Cas9 sont-elles, oui ou non, des OGM ? Non, ont tranché les Etats-Unis, le Canada et Israël. Oui, a jugé en janvier le procureur de la Cour de justice de l'Union européenne. *« Les Etats-Unis et Israël considèrent le résultat final obtenu : en principe, rien ne distingue les mutations produites pas ces nouvelles techniques d'édition des génomes des mutations qui ont lieu dans la nature. Il n'y a pas d'ADN étranger inséré »*, explique Avraham Levy. Mais les Européens, eux, considèrent le procédé, qui est une transgenèse.

Un dernier mot sur la *« reine des fleurs »*, selon Mohammed Bendahmane, de l'ENS de Lyon. Depuis près de dix ans, ce chercheur s'attache à produire une séquence de qualité du génome du rosier – un challenge, au vu de sa complexité. Il touche au but. Les enjeux sont énormes : la rose est *« la fleur la plus vendue au monde »*. Son objectif : identifier très finement les rouages moléculaires de la floraison du rosier, les voies métaboliques de ses parfums et de ses couleurs… On pourra alors, espère le chercheur, *« mieux sélectionner les traits recherchés »*, sans même recourir à une manipulation génétique.

Florence Rosier, *Le Monde* daté du 02.05.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Florence Rosier revient ici sur un succès évolutif majeur dans le monde végétal : la fleur. Dans notre vie quotidienne, nous profitons des attraits des fleurs sans penser que leurs caractéristiques, si appréciées, sont le résultat d'une longue évolution. Les plantes sont des êtres vivants fixés incapables de se déplacer pour rencontrer leur partenaire sexuel lors de la reproduction. La fleur, en attirant les pollinisateurs, permet la reproduction des plantes. **Cet article fait un point complet sur l'organisation de la fleur et sur le contrôle génétique de cette organisation.** Il questionne également l'histoire évolutive de la fleur, apparue il y a 150 millions d'années, et en particulier son immense succès évolutif.»

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Haro scientifique mondial sur les néonicotinoïdes

Dans la revue *Science*, plus de 200 spécialistes appellent à interdire sans délai ces insecticides impliqués dans l'effondrement de la biodiversité terrestre et aquatique.

Il faut restreindre considérablement, et d'urgence, l'usage des insecticides néonicotinoïdes – « néonics » pour les intimes. C'est, en substance, le message d'un bref texte publié, vendredi 1er juin, par la revue *Science* et endossé par 233 scientifiques internationaux. Hasard du calendrier, l'appel coïncide avec la publication, par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), d'un rapport très attendu sur les alternatives possibles des usages agricoles de ces substances. Selon l'Anses, des alternatives non chimiques existent dans près de 80 % des situations étudiées.

« Parce que [les néonicotinoïdes] *sont des neurotoxiques, ils sont hautement toxiques pour les insectes, une classe d'organismes qui représentent la majorité des formes de vie terrestres décrites, et qui inclut de nombreuses espèces d'une importance vitale pour les humains, comme les pollinisateurs et les prédateurs des ravageurs des cultures,* écrivent dans *Science* le biologiste Dave Goulson (université du Sussex, Royaume-Uni) et ses 232 cosignataires. *Il a été démontré qu'ils sont hautement persistants dans l'environnement, si bien que des résidus significatifs sont communément retrouvés dans les sols, les fleurs sauvages, les cours d'eau et les lacs. Par exemple, une étude récente publiée par* Science *a montré la présence de néonicotinoïde dans 75 % d'échantillons de miel collectés partout sur Terre. »*

Pour ces scientifiques, les faits disponibles *« suggèrent fortement que ces produits nuisent aux insectes auxiliaires et contribuent à l'actuelle perte massive de biodiversité ». « Il y a nécessité immédiate d'accords nationaux et internationaux pour restreindre fortement leur usage, et d'empêcher l'homologation d'agrotoxiques similaires dans l'avenir »,* ajoutent-ils.

La France pionnière

Cette mise en garde du monde scientifique contre les néonicotinoïdes n'est pas la première du genre. En France, un rapport d'experts commandé en 2001 par Jean Glavany, alors ministre de l'agriculture, suggérait déjà que le néonicotinoïde le plus couramment utilisé était plausiblement responsable des troubles de l'abeille dénoncés par les apiculteurs depuis le milieu des années 1990. Depuis, des publications scientifiques alertant sur les risques liés à ces substances ont été publiées régulièrement. Elles ont été synthétisées en 2015 dans la revue *Environmental Science & Pollution Research*.

En Europe, trois des principaux néonicotinoïdes ont été fortement restreints, fin avril, après un vote des Etats membres en comité d'experts. Et la France est à ce jour le seul pays dans le monde à avoir inscrit dans la loi, en août 2016, une sortie de tous les néonicotinoïdes, dès le 1er septembre – des dérogations demeurant possibles jusqu'en juillet 2020. C'est dans ce cadre que l'Anses a été saisie, en 2016, par l'ancien ministre de l'agriculture Stéphane Le Foll, pour examiner les alternatives possibles à leur utilisation. L'Anses a identifié 130 usages agricoles différents de ces molécules. Dans 78 % des cas analysés, au moins une solution alternative non chimique existe, explique l'agence dans un communiqué : *« En l'état actuel des connaissances, les méthodes non chimiques apparaissant comme les plus aptes à remplacer immédiatement, efficacement et durablement les néonicotinoïdes sont la lutte biologique* [utilisant des prédateurs naturels des insectes ciblés]*, la lutte physique par application d'une couche protectrice (huile de paraffine, argile…), et la lutte par confusion sexuelle*[emploi de phéromones des insectes ravageurs]*, lorsque ces méthodes sont d'ores et déjà disponibles en France ou aisément transférables. »*

Dans 89 % des cas, on peut aussi remplacer les néonicotinoïdes par d'autres classes d'insecticides – en particulier des pyréthrinoïdes. Dans 6 cas sur les 130 examinés, aucune alternative, chimique ou non chimique, n'a été identifiée par les experts réunis.

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article relaye un nouveau cri d'alarme des scientifiques sur l'utilisation des insecticides néonicotinoïdes. Il est maintenant solidement établi que ces molécules sont toxiques pour les pollinisateurs comme pour les prédateurs des ravageurs des cultures et qu'elles persistent longtemps dans l'environnement. Elles participent fortement à l'effondrement de la biodiversité actuelle des insectes. Depuis le 1er septembre 2018, la France a interdit l'utilisation des néonicotinoïdes, mais cette mesure est malheureusement assortie de dérogation, qui en limitent la portée. Il est urgent de généraliser l'interdiction de ces molécules si délétères pour la biodiversité tout en investissant dans la recherche d'alternatives pour aider les agriculteurs dans leurs pratiques culturales.

Alternatives non chimiques

Jean-Marc Bonmatin, chercheur (CNRS) au Centre de biophysique moléculaire d'Orléans, qui a coordonné de nombreux travaux sur le sujet, salue le rapport de l'Anses, le premier du genre rendu par une agence réglementaire. *« Le point majeur est qu'il est possible, dans presque 80 % des situations, de se passer complètement de pesticides, ce qui montre que nous sommes sur une mauvaise voie depuis longtemps,* dit-il au *Monde*. *Je regrette cependant qu'une alternative socio-économique aux néonicotinoïdes, la mise en place d'un fonds commun d'assurance, permettant à des agriculteurs d'assurer leurs récoltes en cas d'attaques de ravageurs, et d'éviter ainsi des traitements la plupart du temps inutiles, n'ait pas été retenue par les experts. »*

Un tel système d'assurance a été mis en place avec succès dans le nord-est de l'Italie, ou 50 000 hectares de maïs ne sont plus traités préventivement aux néonicotinoïdes, toute perte de récolte étant assurée. « *Ce type d'alternatives socio-économiques est très prometteur, mais elles ne peuvent être rapidement déployées à une grande échelle,* répond-on à l'Anses. *Mais notre rapport, qui a dû être établi en un temps record vu l'ampleur du travail, devait inventorier les alternatives immédiatement disponibles, en vue de l'interdiction de ces molécules. »*

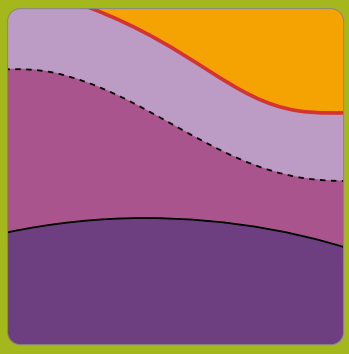
De son côté, la Société nationale de protection de la nature (SNPN), une société savante fondée en 1854, dont le président d'honneur, François Ramade (université Paris-Sud), est l'un des pères de l'écotoxicologie française, appelle le gouvernement français à la *« vigilance ». « La France a pris une position pionnière en interdisant les néonicotinoïdes et toute substance insecticide de même mode d'action neurotoxique,* explique la SNPN dans un communiqué du 1er juin. *La vigilance s'impose car cette loi pourrait être vidée de son sens et son efficacité compromise par de complaisantes dérogations. »*

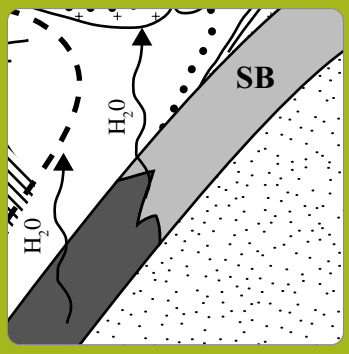
Pour la SNPN, l'urgence tient en un chiffre : *« De récentes recherches en Allemagne,* ajoute la société savante, *ont démontré un effondrement de la biomasse totale des insectes volants, de près de 80 % en trois décennies. »*

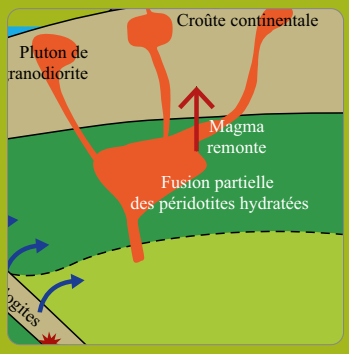
Stéphane Foucart, *Le Monde* daté du 04.06.2018

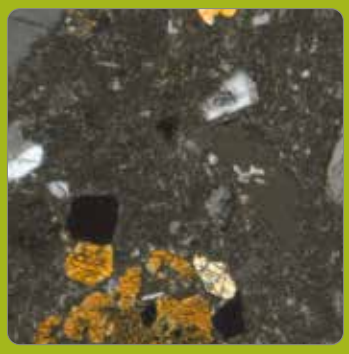
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE DOMAINE CONTINENTAL ET SA DYNAMIQUE









© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

Environ 30 % de la superficie totale du globe terrestre sont occupés par les terres émergées. L'altitude moyenne des continents est de 870 m au-dessus du niveau de la mer, culminant à 8 847 m (mont Everest). Les caractéristiques de la croûte continentale permettent d'expliquer son épaisseur, son comportement et ses reliefs.

La composition de la croûte continentale

La croûte continentale est majoritairement formée de **roches magmatiques** (dont le granite et des roches voisines du granite), mais aussi de **roches sédimentaires et de roches métamorphiques**.
Observé à l'œil nu et au microscope polarisant, un échantillon de granite montre trois types de minéraux : du **quartz**, des **feldspaths** (alcalins comme l'orthose ou plagioclases) et des **micas**.

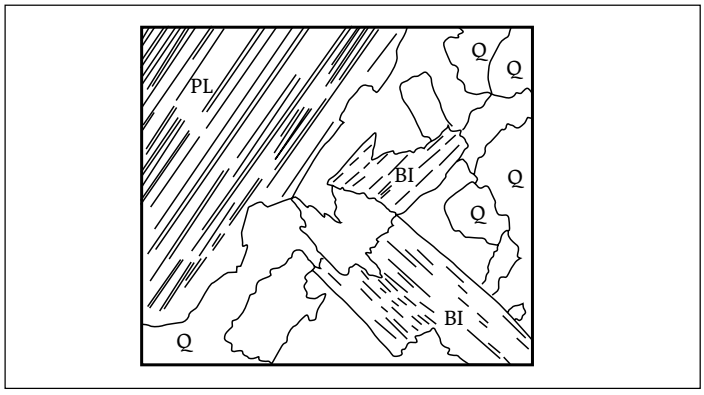


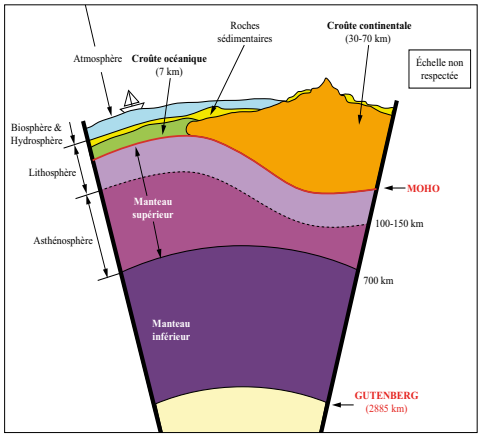
Schéma interprétatif d'une lame mince de granite observée au microscope.
Q : Quartz, BI : Biotite (mica noir), PL : Feldspaths plagioclases.

L'épaisseur de la croûte continentale

Le forage le plus profond réalisé dans la **lithosphère** (en péninsule de Kola) est d'environ 12 km et n'a pas pu traverser la croûte. Des études sismiques indirectes permettent d'estimer la profondeur de la **discontinuité de** Mohorovičić **(Moho)**, qui correspond à la limite entre la croûte et le manteau. Elle est estimée à 30 km en moyenne, mais n'est pas identique en tout point du globe.

Au niveau des **chaînes de montagnes**, on observe un épaississement crustal lié à un raccourcissement dont les preuves sont visibles sur le terrain (voir ci-contre).
Les **roches compressées**, transportées à haute altitude ou au contraire enfouies sous de grandes profondeurs, subissent des modifications liées aux variations de pression et de température (**métamorphisme**). Les transformations minéralogiques sont accompagnées de changements de texture, les minéraux s'alignant progressivement en feuillets (schistes, gneiss). Ces variations de pression et de température peuvent entraîner une fusion partielle et produire du magma.

Densité et isostasie



L'épaississement crustal observé au niveau des chaînes de montagnes pourrait suggérer un excès de masse. Mais en réalité elles exercent une attraction moindre que celle à laquelle on pourrait s'attendre. Ceci

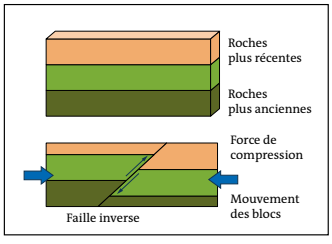
PERSONNAGE

ANDRIJA MOHOROVIČIĆ (1857-1936)

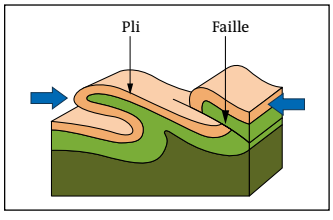
Au début du XXe siècle, ce météorologue et sismologue croate commença à s'intéresser à la propagation des ondes sismiques. Suite au tremblement de terre de Pokuplje, à proximité de Zagreb, le 8 octobre 1909, il interpréta les sismogrammes et mit en évidence la discontinuité entre la croûte et le manteau qui porte son nom (Moho).

ZOOM SUR...

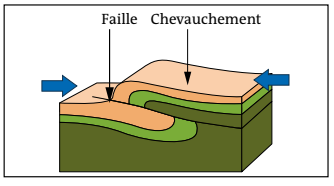
LES PLIS ET LES FAILLES



Les plis se forment par flexion plastique des roches.



Les mouvements relatifs des roches le long des failles inverses témoignent du raccourcissement.

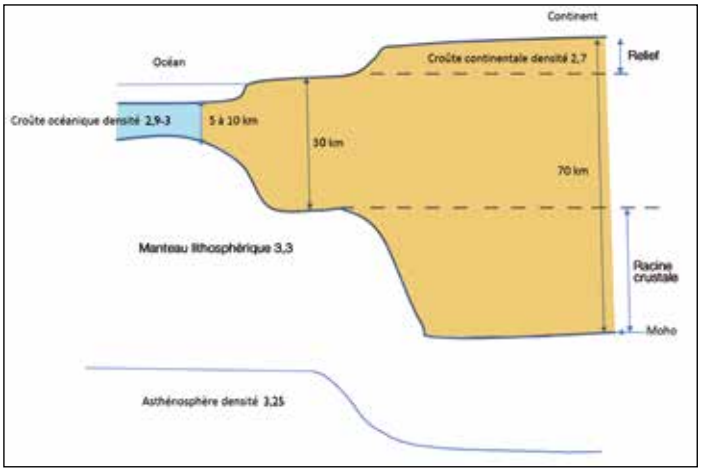


Un chevauchement conduit des ensembles de terrains anciens à en recouvrir de plus récents. Un charriage est un chevauchement de grande ampleur pouvant dépasser la centaine de kilomètres.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Cascade de l'Arpenaz

peut s'expliquer par la présence d'une **racine crustale**, compensant les reliefs en profondeur, en accord avec les mesures de profondeur du Moho. En effet, la **densité** moyenne de la croûte continentale est de 2,7, tandis que celle du manteau lithosphérique est de 3,3.
Il existe en profondeur une surface de compensation sur laquelle les pressions exercées par les roches sont égales : il y a **équilibre isostatique**.
Selon le **modèle d'Airy**, en fonction du relief en surface et de la densité des matériaux, des « colonnes » de roches sont donc plus ou moins épaisses en profondeur. Au niveau des domaines continentaux, la racine crustale constituée de matériaux peu denses s'étend sur une épaisseur proportionnelle à l'altitude du massif, à la profondeur de compensation.
Cet état d'équilibre réalisé à une profondeur variable de la Terre est l'**isostasie**. Au cours du temps, l'érosion élimine progressivement une partie du massif, ce qui provoque une remontée isostatique de la racine crustale. Des roches initialement en profondeur peuvent alors parvenir en **surface**.



L'âge des roches

Alors que la **croûte océanique** n'excède pas 200 Ma, la **croûte continentale** peut en certains endroits du globe dépasser 4 Ga. Une **roche sédimentaire** est plus récente que celle qu'elle recouvre (sauf accident tectonique) et peut être datée en fonction des fossiles qu'elle contient. Pour les **roches magmatiques**, il est nécessaire de recourir à la datation absolue. Cette méthode de datation est basée sur la décroissance radioactive de certains isotopes radioactifs comme le ^{87}Rb. Leur désintégration en fonction du temps constitue un chronomètre naturel. Le rubidium (Rb) et le strontium (Sr) sont présents en très faible quantité (traces) dans les roches magmatiques. Ils présentent différents **isotopes**. Le spectromètre de masse permet de faire la différence entre ces isotopes car ils n'ont pas la même **masse atomique**. Le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr, avec une période de 48,8. 10^9 ans ($\lambda = 1{,}42.\ 10^{-11}$ an^{-1}) ; le ^{86}Sr est un isotope stable. Lors de la formation d'une roche magmatique, les feldspaths (orthose, plagioclase) et micas incorporent des quantités variables de Rb et Sr. Il n'est pas possible de connaître la quantité initiale d'isotopes radioactifs au moment de la formation de la roche : on utilise les rapports ^{87}Rb/^{86}Sr et ^{87}Sr/^{86}Sr. Après refroidissement du magma, la roche formée ne va plus échanger avec le milieu environnant, on parle de **fermeture du système**. Les isotopes évoluent spontanément selon les lois physiques de désintégration radioactive : la quantité d'éléments pères diminue, la quantité d'éléments fils augmente. En mesurant les quantités actuelles des éléments pères et fils dans un échantillon pour au moins deux minéraux différents, on peut tracer une droite (**isochrone**) et déterminer le temps écoulé depuis la fermeture du système, c'est-à-dire depuis la cristallisation des minéraux lors de la mise en place de la roche par refroidissement du magma.

TROIS ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- **Voyage vers le manteau de la Terre, dans la croûte océanique du Pacifique** p. 41
(Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 16.04.2011)
- **Le voyage sous la Terre du satellite Goce** p. 42
(Christiane Galus, *Le Monde* daté du 17.03.2010)
- **La structure interne des Pyrénées dévoilée** p. 43
(Pierre Rimbert, *Le Monde* daté du 07.09.1995)

ZOOM SUR…

LE PROGRAMME ECORS

Le programme Étude continentale et océanique par réflexion et réfraction sismiques (ECORS), débuté en France en 1983, consiste à explorer la croûte terrestre, ses variations d'épaisseur et sa structure interne afin de déterminer ses propriétés et son évolution. La recherche d'hydrocarbures, l'exploration géothermique et l'évaluation du risque sismique sont des applications pratiques qui en découlent grâce à la connaissance précise des zones sédimentaires et des zones fracturées.

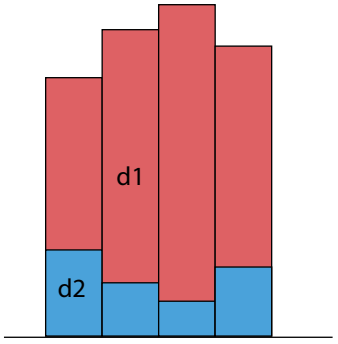
NOTIONS CLÉS

LA STRUCTURE INTERNE DU GLOBE

La Terre est constituée d'enveloppes de compositions chimiques différentes : la croûte, le manteau (constitué de péridotites) et le noyau (contenant principalement du fer et du nickel). La discontinuité de Mohorovičić marque la limite entre la croûte et le manteau. La croûte et la partie rigide du manteau supérieur constituent la lithosphère, découpée en plaques, reposant sur l'asthénosphère, plus ductile.

L'ISOSTASIE D'APRÈS LE MODÈLE D'AIRY

d1 = densité de la croûte continentale = 2,7 ; d2 = densité du manteau = 3,3.
Selon le modèle d'Airy, en fonction du relief en surface et de la densité des matériaux, les « colonnes » de roches sont plus ou moins épaisses en profondeur. Les pressions qu'elles exercent sont égales au niveau de la surface de compensation, où il y a équilibre isostatique.



© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 1 : La caractérisation du domaine continental

L'intitulé complet du sujet

Sélectionnez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.

1. La croûte continentale est principalement formée :

a) de gabbros et de granites.

b) de roches sédimentaires et de granites.

c) de péridotites.

d) de roches voisines du gabbro.

2. Les différences d'altitude entre continents et océans sont dues au fait que :

a) la croûte continentale est moins dense et plus épaisse que la croûte océanique.

b) la croûte continentale est plus dense et plus épaisse que la croûte océanique.

c) la croûte continentale est moins dense et plus fine que la croûte océanique.

d) la croûte continentale est plus dense et plus fine que la croûte océanique.

3. Un granitoïde est une roche :

a) magmatique à structure grenue.

b) magmatique à structure vitreuse.

c) sédimentaire à structure vitreuse.

d) sédimentaire à structure grenue.

4. La croûte continentale :

a) est en moyenne plus jeune que la croûte océanique.

b) est plus dense dans les zones de collision.

c) s'épaissit progressivement dans les zones de collision anciennes.

d) s'altère sous l'effet des agents de l'érosion.

5. La méthode de datation rubidium-strontium est fondée sur la décroissance radioactive du 87Rb, qui se désintègre spontanément en 87Sr, un isotope stable. On mesure dans la roche à dater les quantités de 87Rb, 87Sr et 86Sr, un isotope stable dont la quantité est supposée constante au cours du temps.

a) On connaît les quantités initiales des éléments pères et fils.

b) Le ^{86}Sr est un élément fils du ^{87}Sr.

c) Il est indispensable d'effectuer des mesures sur plusieurs minéraux de la roche à dater.

d) Cette méthode de datation est adaptée aux roches sédimentaires.

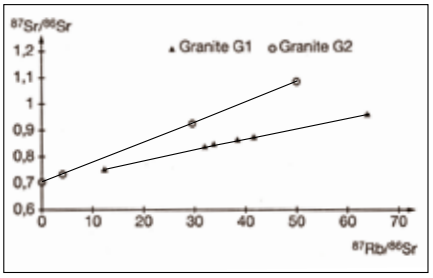
6. Des mesures isotopiques effectuées sur des minéraux des granites G1 et G2 ont permis de construire le graphique ci-dessous. Les droites ont pour équation : $^{87}Sr/^{86}Sr = (\lambda\ t)\ ^{87}Rb/^{86}Sr + {}^{87}Sr_o/^{86}Sr$.

a) Le granite G1 est plus âgé que le granite G2.

b) Le granite G2 est plus âgé que le granite G1.

c) Les granites G1 et G2 sont de même âge.

d) Le coefficient directeur de la droite isochrone ne varie pas de la même façon que t, le temps écoulé depuis la fermeture du système.



Ce qu'il ne faut pas faire

• Se dispenser d'une relecture attentive en fin d'épreuve car il s'agit d'un QCM : les réponses peuvent beaucoup se ressembler et une faute d'inattention est possible.

Le corrigé

1. b), 2. a), 3. a), 4. d), 5. c), 6. b)

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2.1
– Exploiter des documents pour mettre en relation un modèle et des mesures afin d'expliquer la notion d'isostasie.

Partie 2.1
– Identifier dans des documents les preuves d'un raccourcissement et d'un épaississement crustal au niveau d'une chaîne de montagnes.

ZOOM SUR...

LA DATATION ABSOLUE

La datation isotopique a révolutionné la mesure du temps en géologie. En complément de la datation relative, qui permet d'ordonner chronologiquement des événements géologiques les uns par rapport aux autres, la datation absolue permet de leur attribuer un âge, en millions d'années par exemple.

Cependant l'échantillon à dater doit satisfaire à certains critères :

– il doit s'agir d'une roche magmatique dont on datera la cristallisation par refroidissement d'un magma. En effet, une roche sédimentaire est notamment constituée de fragments de reliefs érodés, dont la datation ne donnerait pas l'âge de la formation de la roche sédimentaire elle-même mais de la roche magmatique dont elle est issue par érosion et sédimentation ;

– le système doit être fermé depuis la formation de la roche. Aucun élément ne doit avoir quitté l'échantillon ou y être entré.

Pour dater un échantillon, il faut choisir l'isotope radioactif le plus adapté selon sa demi-vie et l'âge à déterminer. Au-delà de dix fois la demi-vie de l'isotope, toute mesure est impossible. On mesure les quantités d'isotopes radioactifs présents dans l'échantillon en utilisant un spectromètre de masse. On procède ensuite aux calculs.

LA DÉTERMINATION DE L'ÂGE D'UNE ROCHE PAR LA MÉTHODE $^{87}RB/^{87}SR$

$^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr + e^-$

Soit F la quantité de l'isotope fils présente actuellement dans l'échantillon, F_o celle présente initialement, P la quantité de l'isotope père, λ la constante caractéristique du couple isotopique : $F = (\lambda\ t)\ P + F_o$.

La quantité de ^{86}Sr étant stable, on peut utiliser les rapports $^{87}Rb/^{86}Sr$ et $^{87}Sr/^{86}Sr$.

Ainsi $^{87}Sr/^{86}Sr = (\lambda\ t)\ ^{87}Rb/^{86}Sr + {}^{87}Sr_o/^{86}Sr$, soit l'équation d'une droite de coefficient directeur $(\lambda\ t)$

Le coefficient directeur de la droite permet de calculer t, le temps écoulé depuis la formation de la roche.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Voyage vers le manteau de la Terre, dans la croûte océanique du Pacifique

Au large du Costa Rica, une mission internationale va forer l'écorce terrestre sur 2 km pour prélever des roches profondes, témoins de l'histoire géologique de notre planète.

À *mesure que nous descendions, la succession des couches composant le terrain primitif apparaissait avec plus de netteté.* [...] *Jamais minéralogistes ne s'étaient rencontrés dans des conditions aussi merveilleuses pour étudier la nature sur place.* » Dans son *Voyage au centre de la Terre*, publié en 1864, Jules Verne imagine la jubilation du professeur Lindenbrock et de son neveu Axel devant *« ces richesses enfouies dans les entrailles du globe »*.

Un siècle et demi plus tard, l'enthousiasme de Benoît Ildefonse (Laboratoire de géosciences, CNRS-université de Montpellier-II) n'est pas moins vif à l'idée de creuser jusqu'aux couches inférieures de l'écorce terrestre, à 2 km de profondeur, et d'en remonter à la surface, pour la première fois, des roches encore jamais extraites de leur gangue. En attendant de pouvoir un jour traverser cette pellicule superficielle pour accéder, sous la croûte terrestre – épaisse de 30 km en moyenne sur les continents et de 6 km sous les océans –, au manteau qui entoure le noyau de notre planète et qui représente les deux tiers de sa masse.

Le chercheur est l'un des deux codirecteurs, avec le Britannique Damon Teagle (Centre national d'océanographie de l'université de Southampton), de la mission scientifique internationale qui, du 13 avril au 30 juin, va réaliser un forage océanique dans le Pacifique est, au large du Costa Rica, avec le bateau américain *Joides Resolution*. Un bâtiment de 143 m de long, équipé d'un derrick de 61 m de hauteur qui permet de déployer plus de 9 km de tubes de forage dans les abysses, pour atteindre l'écorce terrestre. À bord, un laboratoire peut effectuer l'analyse physique, chimique et magnétique des carottes minérales extraites du sous-sol.

Cette campagne doit pousser plus avant les forages déjà effectués dans le même puits, en 2002 et 2005, jusqu'à une profondeur de 1 500 m. C'est-à-dire sans dépasser la croûte océanique supérieure. L'objectif est cette fois de descendre jusqu'à 2 000 m, au niveau de la croûte océanique inférieure. Là où les basaltes de surface, nés du refroidissement rapide du magma issu de la fusion des roches du manteau, cèdent la place aux gabbros, des roches formées par une cristallisation plus lente du magma.

Le site prospecté se trouve sur la plaque Cocos, près d'une dorsale océanique (zone de divergence entre deux plaques tectoniques où se produisent des remontées de magma) où la formation de la croûte, voilà quinze millions d'années, a été particulièrement rapide. La croûte supérieure y est plus mince qu'ailleurs, ce qui rend les gabbros plus accessibles. *« L'examen d'échantillons de ces roches permettra de mieux connaître la structure de la croûte, la façon dont elle se forme à partir du magma du manteau et leur mode de refroidissement »*, explique Benoît Ildefonse.

Ce n'est qu'un début. L'expédition coïncide avec le 50e anniversaire du plus ambitieux programme de forage scientifique de tous les temps : le projet Mohole, du nom du géologue croate Andrija Mohorovičić qui, dès 1909, avait découvert l'existence, à la limite entre l'écorce et la partie supérieure du manteau terrestre, d'une discontinuité se manifestant par une accélération de la vitesse de propagation des ondes sismiques. Au printemps 1961, au large de l'île mexicaine de Guadalupe, les Américains percèrent plusieurs trous jusqu'à près de 200 m. Mais, faute de techniques de forage adaptées, le projet fut abandonné cinq ans plus tard, après avoir englouti plus de 50 millions de dollars (34,6 millions d'euros environ). Par dérision, l'entreprise fut rebaptisée « Nohole », pas de trou.

Depuis, plusieurs milliers de forages scientifiques ont été conduits, dans le cadre de collaborations internationales dont l'actuelle est l'*Integrated Ocean Drilling Program* (IODP). Mais aucun n'a atteint la discontinuité de Mohorovičić, plus simplement appelée le Moho. Le plus profond n'a pas dépassé 2 111 m. L'exploitation pétrolière offshore va bien au-delà – au large de Cayenne, en Guyane, la compagnie britannique Tullow vient d'entreprendre un forage d'exploration jusqu'à 4 300 m sous le plancher océanique –, mais dans des couches sédimentaires recelant des gisements d'hydrocarbures, et sans carottage de roches, qui exige un équipement plus sophistiqué.

La mission en cours servira de repérage pour une nouvelle tentative de creusement jusqu'au Moho, 4 000 m plus bas. Elle pourrait être décidée, espère Benoît Ildefonse, dans la décennie à venir. Il y faudra des moyens de forage et de carottage encore plus performants. Et un financement international de plusieurs centaines de millions d'euros. C'est à ces conditions que seront mieux compris *« la dynamique interne de notre planète, la tectonique des plaques à l'origine des séismes tels que celui du 11 mars au Japon, ou encore le rôle de la croûte et du manteau terrestres dans le cycle du carbone »*, plaide le chercheur.

« Forer jusqu'au manteau est le plus grand défi de l'histoire des sciences de la Terre, dit-il. *Paradoxalement, nous en savons davantage sur d'autres planètes, grâce aux missions spatiales, que sur la nôtre. »*

Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 16.04.2011

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre que, malgré les techniques de prospection indirecte, les tentatives de forage dans la croûte terrestre à des profondeurs de plus en plus importantes sont toujours d'actualité. Aucun forage n'a jamais atteint la discontinuité de Mohorovičić (le Moho), mais cet objectif est plus envisageable en milieu océanique, où la croûte de 6 km est bien moins épaisse que la croûte continentale (30 km).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le voyage sous la Terre du satellite Goce

En mesurant des variations de gravité, l'engin a fourni une carte mondiale d'une frontière géologique, le Moho.

Lorsque Isaac Newton conçut la loi de la gravitation universelle, il n'imaginait pas que, trois siècles plus tard, des scientifiques utiliseraient les données du champ de gravité terrestre obtenues par des satellites pour étudier les profondeurs inaccessibles de notre globe. Des chercheurs de l'École polytechnique de Milan (Italie), dirigés par Daniele Sampietro, viennent en effet de réaliser la première carte mondiale du Moho, cette zone frontière située entre la croûte terrestre et le manteau supérieur. Ils ont obtenu ce résultat en interprétant les données recueillies par le satellite Goce de l'Agence spatiale européenne (ESA), en orbite à 265 km de la Terre. Cet engin, lancé en mars 2009, a fourni des données gravimétriques d'une finesse inégalée – à l'échelle de 80 km – de l'ensemble du globe. Cette image du Moho a été réalisée dans le cadre d'un projet (Gemma) financé par l'ESA.

Le Moho est le nom de la discontinuité découverte par le sismologue croate Andrija Mohorovičić, alors qu'il étudiait la propagation des ondes sismiques générées par le séisme du 8 octobre 1909 en Croatie. Il avait découvert à cette occasion que les ondes accéléraient après le Moho. Ce dernier est situé en moyenne à une profondeur de 25 km à 60 km sous les continents et de 5 km à 8 km sous les océans. Au-delà, on trouve le manteau, puis le noyau liquide et la graine (le noyau solide), située à plus de 5 000 km de profondeur.

« Cartographie globale »

Toutes ces données ont été fournies grâce aux ondes sismiques. Car personne – contrairement aux héros de Jules Verne – n'a pu aller sonder le centre de la Terre. Les Américains, les Allemands et les Russes ont bien tenté de forer le Moho, sans résultat, bien que les Russes aient atteint la profondeur de 12 km en 1989 dans la presqu'île de Kola.

Jusqu'à présent, on possédait bien des données éparses sur les différentes profondeurs du Moho, obtenues par les ondes sismiques ou des données gravimétriques locales, dont les variations reflètent la différence de densité entre les roches de la croûte et celles du manteau. Mais *« l'hétérogénéité de ces informations dans le temps et dans l'espace se traduit par de grandes erreurs dans le résultat final »*, estime Daniele Sampietro.

Aujourd'hui, grâce à Goce, *« les chercheurs italiens ont réalisé une cartographie globale de l'épaisseur de la croûte terrestre »*, explique Michel Diament, spécialiste de gravimétrie à l'Institut de physique du globe de Paris. Or la croûte terrestre et le manteau supérieur sont d'un grand intérêt pour les scientifiques. C'est l'endroit où se situe la plus grande partie des processus géophysiques importants liés à la tectonique des plaques, tels les séismes, les volcans et la naissance des montagnes.

Mais comment des données gravimétriques peuvent-elles fournir des renseignements sur la structure interne de la Terre ? *« Si la Terre était un oignon, avec des couches homogènes et sphériques, la pesanteur serait partout la même à la surface du globe,* précise Michel Diament. *Or la Terre est hétérogène. Il y a des endroits plus ou moins denses, si bien que la pesanteur est variable et reflète la répartition hétérogène de la matière à différentes profondeurs. »*

Cette répartition hétérogène des masses à l'intérieur de la Terre contrôle également le géoïde, la forme qu'aurait la Terre si elle était recouverte entièrement d'océans. Et les scientifiques ont découvert des choses surprenantes. En étudiant la trajectoire des satellites, qui subit l'influence du champ de gravité terrestre, ils ont mis en évidence une Terre cabossée, invisible à l'œil nu, avec des bosses sur la Papouasie-Nouvelle-Guinée et le Pacifique ouest, et un grand creux associé à l'océan Indien. Les six accéléromètres de Goce ont confirmé ces données avec une précision inégalée.

Christiane Galus, *Le Monde* daté du 17.03.2010

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article récent montre l'évolution des techniques de détermination de la profondeur du Moho, la limite entre la croûte terrestre et le manteau. C'est un satellite mesurant les variations de la gravité, liées à l'hétérogénéité de densité des matériaux, qui a permis d'en réaliser une carte mondiale.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La structure interne des Pyrénées dévoilée

Des chercheurs dressent une carte tridimensionnelle de la chaîne.

Il y a 65 millions d'années, l'Espagne faisait une entrée « fracassante » au sein de l'Europe. De la collision entre les plaques tectoniques Eurasie, au nord, et Ibérie, au sud, naissait alors la chaîne des Pyrénées. Les mécanismes géologiques ayant conduit à cette formation sont encore controversés. Annie Souriau, du Laboratoire de dynamique terrestre et planétaire, de Toulouse, et Michel Granet, de l'Observatoire de physique du globe, de Strasbourg, ont mené une étude sur la structure profonde des Pyrénées. Les chercheurs ont utilisé pour cela une technique, très prometteuse, d'analyse du temps de propagation des ondes sismiques qui diffère des systèmes (camions vibreurs) habituellement utilisés par les pétroliers. Résultat : une véritable radiographie d'est en ouest des Pyrénées, interprétable en trois dimensions, détaillant avec précision la situation des couches géologiques jusqu'à une profondeur de 200 kilomètres.

Cette étude valide un modèle de formation de la chaîne montagneuse, lié à l'histoire tectonique mouvementée de l'Espagne. Située, il y a 200 millions d'années, à l'ouest de la France, alors que la Galice est en face du Finistère, la plaque Ibérie entame une lente rotation vers le sud. Tournant autour d'un axe situé à l'ouest des Pyrénées, elle ouvre, sur son passage, le golfe de Gascogne. Repoussée par la plaque africaine, elle entre en contact avec l'Europe. Lors de cet affrontement tectonique, la plaque Ibérie s'encastre dans son vis-à-vis européen. La partie supérieure de la croûte s'élève alors et forme les Pyrénées.

L'étude des chercheurs a montré que la partie inférieure de la croûte ibérique a amorcé un plongeon sous son homologue européenne. Elle s'est ensuite enfoncée sous l'écorce terrestre, dans une zone connue sous le nom de manteau, jusqu'à une profondeur de 100 kilomètres. Ces travaux ont également mis en évidence la remontée et la percée à travers la croûte de deux gros blocs d'origine profonde. Invisibles en surface, ils coïncident avec des anomalies gravimétriques connues par ailleurs. La morsure de ces deux « dents » rocheuses à travers la couche sédimentaire pourrait expliquer une partie importante de l'activité sismique de cette région.

Un large réseau de stations

Pour parvenir à ces résultats, les chercheurs ont mesuré et analysé les temps de propagation des ondes sismiques provenant de séismes locaux ou lointains. Chaque couche traversée par le train d'ondes est caractérisée par une vitesse de propagation spécifique. Si le sous-sol est homogène, le temps de propagation des ondes ne dépend que de la distance de leur foyer. En revanche, toute discontinuité de la structure interne provoque une avance ou un retard du front d'ondes. Ainsi, la traversée d'une structure à vitesse de propagation élevée sera mise en évidence par une légère avance du signal. La comparaison des temps d'arrivée permet de localiser la position de chaque anomalie.

Mais, pour obtenir une carte tridimensionnelle à grande échelle d'une chaîne de collision, il faut disposer d'un large réseau de stations capables de recevoir et d'enregistrer les ondes sismiques. La précision de l'étude en dépend. Le massif pyrénéen est équipé d'un grand nombre de sismographes, installés notamment à la suite du tremblement de terre qui secoua le village d'Arette, le 13 août 1967, au sud-ouest de Pau (Pyrénées-Atlantiques). Ce séisme, d'une magnitude de 5,7 sur l'échelle de Richter, détruisit le petit village pyrénéen et causa la mort d'une personne.

Annie Souriau et Michel Granet ont ainsi bénéficié des données issues d'une quarantaine de stations fixes françaises et espagnoles, dont certaines mises en place dans des buts très divers : enregistrements sismiques, contrôle des avalanches en Espagne ou surveillance du gisement de gaz de Lacq en France. Mais, regrette Annie Souriau, le fonctionnement du réseau pyrénéen, géré par l'Observatoire Midi-Pyrénées, est aujourd'hui menacé d'interruption. Les stations nécessitent un entretien régulier et minutieux. Or, les ingénieurs en charge de cette tâche, bientôt à la retraite, ne seront pas remplacés cette année.

Pierre Rimbert, *Le Monde* daté du 07.09.1995

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article déjà ancien décrit le principe et les intérêts de la prospection sismique pour la compréhension de la structure profonde des chaînes de montagnes. Complémentaires de l'étude des affleurements et des roches, ces techniques permettent de reconstituer l'histoire d'un relief, selon des scénarios qui ont évolué depuis 1995 au gré des nouvelles découvertes.

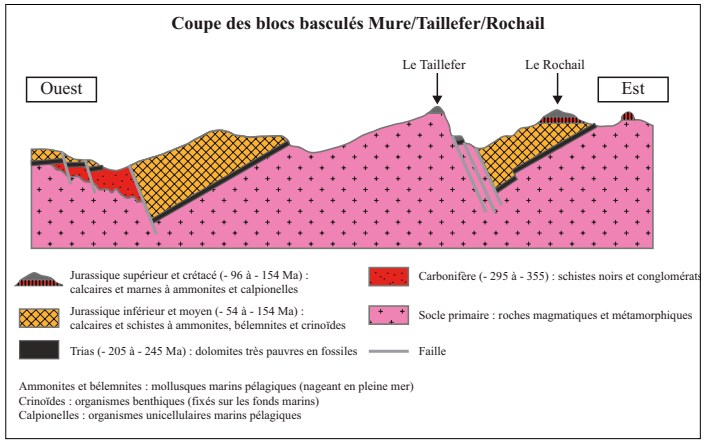
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs

Une partie des terres émergées est formée de chaînes de montagnes, anciennes ou toujours en cours de surrection. L'exemple des Alpes permet d'étudier la formation d'une chaîne de collision dans un contexte de convergence lithosphérique. Les traces d'un ancien domaine océanique y témoignent de sa fermeture par subduction. Au cours du temps, les chaînes de montagnes, comme tous les reliefs formés à la surface de la Terre, tendent à disparaître : la lithosphère continentale est recyclée en permanence.

Les traces d'un ancien océan

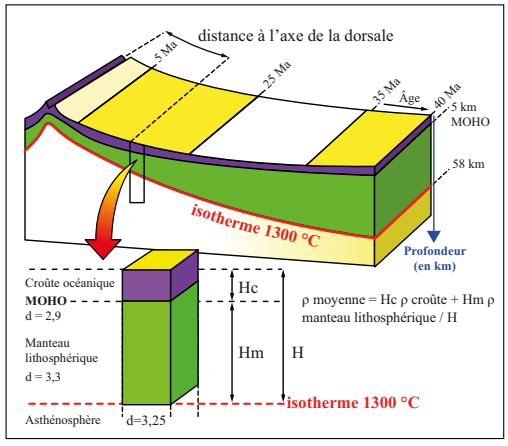
Le mont Chenaillet, situé dans les Alpes, est composé de roches basaltiques en forme de coussins, qui rappellent les *pillow-lavas* des dorsales océaniques. Sous ce basalte se trouvent successivement des gabbros et des péridotites : il s'agit d'une **série ophiolitique**, vestige d'une lithosphère océanique de 155 Ma, charriée sur le continent.
Dans la zone dauphinoise, près du Bourg-d'Oisans, des blocs basculés séparés par des failles normales sont recouverts de formations sédimentaires, rappelant les **dépôts des marges passives**. Ce sont les vestiges de la naissance d'un océan.



Vestiges de marges passives dans les Alpes

L'une des causes de la subduction

La **lithosphère océanique** est formée de **croûte océanique** (densité 2,9) et de **manteau lithosphérique** (densité 3,3). La **densité globale** de la lithosphère océanique dépend des épaisseurs relatives de croûte et de manteau. La limite avec le manteau asthénosphérique est une limite physique qui définit le comportement plus ou moins ductile des péridotites : l'**isotherme 1 300 °C**. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit, l'isotherme 1 300 °C s'enfonce, et le manteau lithosphérique s'épaissit : la densité de la lithosphère océanique augmente au cours du temps.



Détail de la structure d'une lithosphère océanique / Évolution de la lithosphère océanique au cours du temps

MOTS CLÉS

DENSITÉ
Rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau (ou d'air pour les gaz).

MARGE ACTIVE
Limite océan/continent qui correspond à une frontière de plaque convergente.
Les marges actives sont le siège de la subduction et se caractérisent par une importante activité sismique et volcanique.

MARGE PASSIVE
Zone de transition entre une croûte continentale et une croûte océanique au sein d'une même plaque lithosphérique. L'histoire de la naissance des océans est enregistrée au niveau de leurs marges passives (failles normales et sédimentation caractéristiques du *rifting*).

PLAQUE LITHOSPHÉRIQUE
Portion de lithosphère d'une centaine de kilomètres d'épaisseur, aux frontières de laquelle des reliefs (dorsales, chaîne de montagnes, fosse océanique) et une activité sismique et/ou volcanique sont observés en relation avec les mouvements relatifs des autres plaques.

NOTION CLÉ

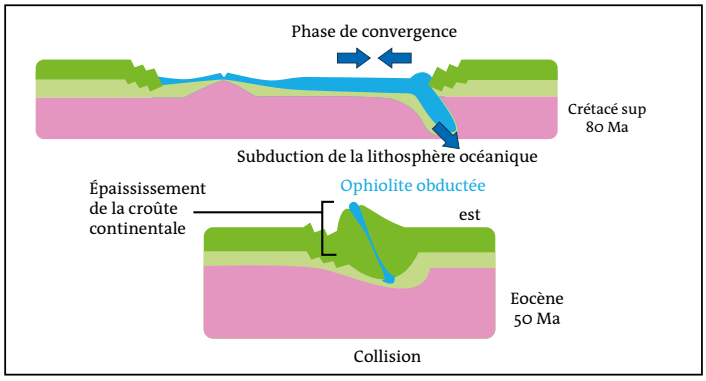
LA TECTONIQUE DES PLAQUES
Il s'agit d'une théorie élaborée à la fin des années 1960.
Trois types de mouvements relatifs des plaques sont observés à leurs limites :
– des mouvements de convergence au niveau des chaînes de montagnes et des zones de subduction ;
– des mouvements de divergence au niveau des dorsales océaniques où il y a création de lithosphère océanique ;
– des zones de coulissage où il n'y a ni création ni destruction de surface lithosphérique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Entre 30 et 50 Ma, la lithosphère océanique devient plus dense que l'asthénosphère (densité 3,25) et peut plonger par **subduction**, si les conditions y sont favorables. Ceci explique qu'il n'existe pas de lithosphère océanique plus ancienne que 200 Ma.

La collision

Lorsque l'**océan** séparant deux continents s'est **refermé** et que la **croûte océanique** est **entièrement subduite**, les deux masses continentales s'affrontent. Entre elles subsiste la « suture » de matériaux océaniques. L'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, mais la partie supérieure de la croûte s'épaissit par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques.



La naissance d'une chaîne de montagnes

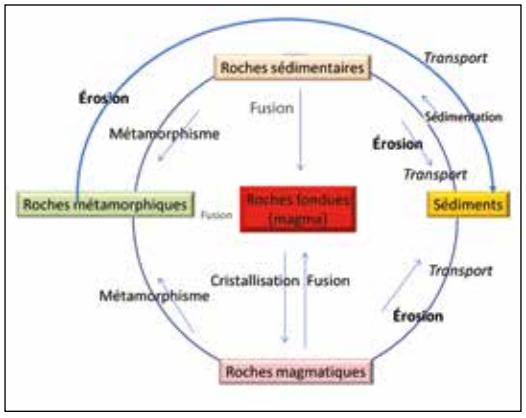
Des transformations minéralogiques

Au cours de la subduction et de l'épaississement, les roches sont soumises à des variations importantes de pression et de température, à l'origine de la transformation des minéraux : c'est le **métamorphisme**. Les minéraux trouvés dans les roches alpines montrent que celles-ci ont été soumises à des pressions et des températures élevées avant de revenir en surface. Dans le domaine interne des Alpes, le métamorphisme a une intensité croissante de l'ouest vers l'est (la pression et la température auxquelles ont été soumises les roches sont de plus en plus élevées) : ceci indique le **sens de la subduction**. Les basaltes et les gabbros sont métamorphisés en métagabbros à faciès à schistes vert à chlorite et actinote, puis à faciès à schistes bleus à glaucophane, puis à faciès à éclogite à grenat, témoignant du métamorphisme haute pression / basse température, caractéristique de la subduction ayant précédé la collision. Ces roches métamorphiques ont une densité plus élevée que les roches d'origine. Ceci a renforcé l'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère au cours de la subduction.

La disparition des reliefs

Plusieurs **orogenèses** se sont succédé au cours de l'histoire de la Terre : **calédonienne** (480-420 Ma), **hercynienne** (320-260 Ma) et **alpine**. Les reliefs de la Grande-Bretagne, de la Scandinavie et du Groenland sont des vestiges de la première ; les Ardennes, les Vosges, le Massif central et le Massif armoricain, de la deuxième. Ces reliefs ont depuis été érodés. Tout relief est donc un **système instable** qui tend à disparaître aussitôt qu'il se forme.

Des **événements tectoniques** peuvent fragiliser des édifices rocheux. D'autres facteurs, liés au **climat** et à l'**altitude**, participent à l'érosion (eau, vent). Les végétaux y contribuent également par la sécrétion de substances acides ou en s'insinuant dans les fissures déjà formées. L'**eau** est un facteur chimique, mais aussi physique, d'érosion : les vagues, les torrents, les glaciers modifient les paysages. Chargé de particules de sable, le **vent** rabote et polit les amas rocheux. Les blocs et les particules glissent le long de la pente formée par le relief, puis peuvent être transportés par l'eau ou le vent très loin du lieu d'altération, en fonction de leur taille. Les sédiments se déposent lorsqu'ils rencontrent un obstacle ou un bassin. Ils peuvent alors former une **roche sédimentaire**. La croûte continentale est recyclée en permanence



Le cycle des roches

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- **Le Népal est sous la menace d'un séisme encore plus puissant** p. 48
(Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 28.04.2015)
- **Tremblements de terre en série sur la « ceinture de feu du Pacifique »** p. 49
(Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 19.04.2016)

MOT CLÉ

MÉTAMORPHISME

Transformations minéralogiques et structurales d'une roche à l'état solide, sous l'effet de variations de température et de pression, sans modification importante de sa composition chimique.

ZOOM SUR…

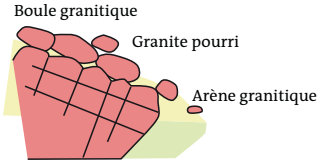
DES TÉMOINS DE L'HISTOIRE ALPINE

- Des roches prélevées en Vanoise ont été soumises à une pression de 11 kbars, correspondant à une profondeur de 33 km et à une température de 390 °C.
- Des roches prélevées au mont Viso (zone de fort métamorphisme) témoignent d'une pression de 21 kbars (63 km de profondeur) et d'une température de 550 °C.
- La coésite trouvée dans le massif italien Dora-Maira correspond à du quartz soumis à des pressions supérieures à 30 kbars (90 km de profondeur).

On peut dater les événements métamorphiques et les placer dans un diagramme afin de tracer un trajet pression-température-temps et de reconstituer une partie de l'histoire de la chaîne de montagnes.

L'ÉROSION DU GRANITE

Un massif granitique va s'altérer, devenant du granite pourri et une arène granitique, un sable dans lequel des grains de feldspaths, des paillettes de mica et des grains de quartz sont identifiables. Si le massif est exposé au soleil, le mica noir emmagasine la chaleur et se dilate. Pendant la nuit, la roche refroidit et se contracte de façon différente dans les parties superficielles et profondes. Des fissures se forment, dans lesquelles l'eau de pluie va pouvoir s'insinuer. Une succession de gel/dégel fragilise la roche et élargit les fissures.



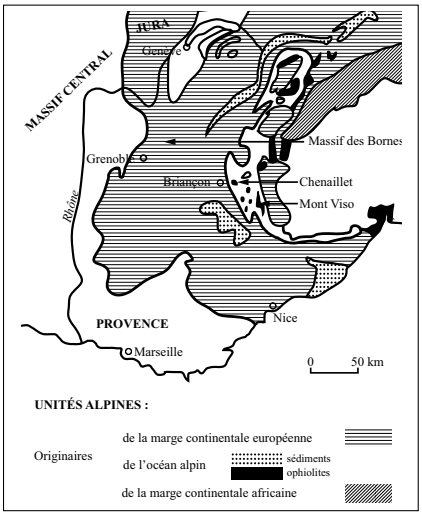
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.2 : La formation des Alpes

L'intitulé complet du sujet

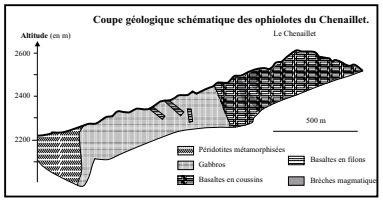
On cherche à montrer comment des données de terrain peuvent permettre de comprendre des événements géologiques anciens.
Vous avez effectué une excursion géologique dans les Alpes et rapporté des échantillons et des photographies. En vous appuyant sur ces données de terrain et d'autres informations présentes dans le dossier, rédigez un compte-rendu de votre excursion, illustré par un ou plusieurs schémas, pour montrer que les indices recueillis permettent de comprendre certaines étapes de l'histoire de la formation de cette chaîne de montagnes. Votre réponse s'appuiera sur l'exploitation du dossier. Aucune étude exhaustive des documents n'est attendue.

Document de référence : Carte simplifiée des Alpes



Les documents

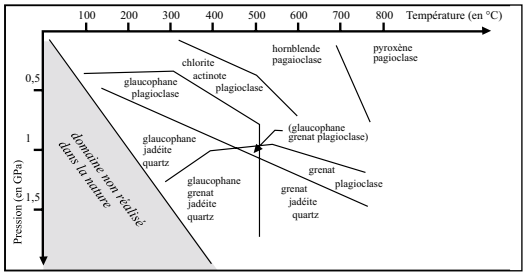
Document 1 : Coupe géologique schématique des ophiolites du Chenaillet



Les basaltes supérieurs sont âgés de 100 millions d'années
Les plus vieux sédiments océaniques (non figurés sur la coupe) qui surmontent les basaltes ont 65 millions d'années.

Source : *Comprendre et enseigner la planète terre*. Caron *et al*. Ophrys

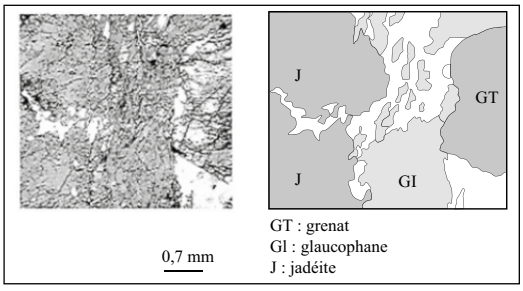
Document 2 : Domaines de stabilité de quelques associations de minéraux de la croûte océanique



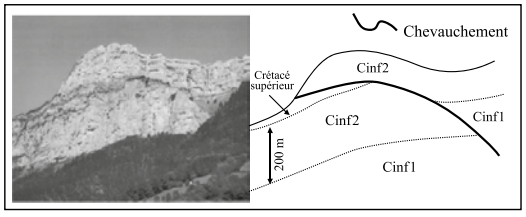
Remarque : les transformations minérales étant très lentes, des minéraux formés dans un domaine de température et pression donné peuvent être encore présents même si la roche n'est plus dans ce domaine (minéraux reliques).

Source : Centre Briançonnais de Géologie Alpine

Document 3 : Observation microscopique d'un métagabbro du mont Viso (Alpes italiennes) et son schéma interprétatif



Document 4 : Rochers de Leschaux dans les Alpes (massifs des Bornes, Haute Savoie, Nord de Grenoble) et croquis d'interprétation.
(Crédit photographique : Christian Nicollet/ UBP Clermont-Ferrand)



Cinf 1 et Cinf 2 : couches datées du crétacé inférieur.
Cinf 1 est une couche plus ancienne que Cinf 2. Elle est constituée d'épaisses masses de calcaires blancs à Rudistes et Orbitolinidés (mollusques et foraminifères marins fossiles).

ZOOM SUR...

L'HISTOIRE DES ALPES

Elle commence par la mise en place d'un fossé d'effondrement continental, prélude du futur océan alpin. Une mer de faible profondeur s'engouffre. Au jurassique, l'océanisation proprement dite est en marche : l'océan alpin sépare l'Europe de l'Afrique. De la lithosphère océanique est créée vers – 140 Ma au niveau d'une dorsale ; l'océan est en expansion. Les marges de l'océan sont passives, des sédiments post-rift témoignant de l'arrêt du *rifting* se déposent. La datation paléontologique de roches contenant des fossiles marins indique que l'ouverture océanique (accrétion) s'est déroulée du jurassique (– 170 Ma) au crétacé supérieur (– 70 Ma), avec une vitesse d'expansion de l'ordre de 1 cm par an. Au crétacé inférieur, l'océan alpin a atteint sa taille maximale (1 000 km de largeur estimée). Au crétacé supérieur, la fermeture de l'océan s'enclenche par subduction. Après disparition de l'océan, la marge continentale européenne est entraînée à son tour dans la subduction, puis la collision proprement dite débute, aux alentours de – 35 Ma. Un vestige de croûte océanique a échappé à la subduction, ce sont les ophiolites : les nappes ophiolitiques (Chenaillet) viennent reposer sur le domaine briançonnais de la marge européenne.

DES TÉMOINS OCÉANIQUES

Certaines régions des Alpes présentent des affleurements de roches sédimentaires riches en fossiles marins, témoins de l'ancien domaine océanique :
– les calcaires à rudistes (mollusques bivalves) ou à orbitolines (animaux unicellulaires) des massifs du Vercors et de la Chartreuse témoignent de récifs coralliens dans une mer peu profonde et chaude ;
– les radiolarites du Chenaillet sont formées par l'accumulation de squelettes en silice de radiolaires, des animaux planctoniques unicellulaires ; elles témoignent d'un océan de grande profondeur.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Ce qu'il ne faut pas faire

- Faire une étude exhaustive des documents sans faire de liens entre les indices recueillis.
- Omettre de respecter la forme imposée par le sujet : un compte-rendu d'excursion.
- Se dispenser de faire appel à ses connaissances.
- Négliger les schémas.

L'analyse du sujet

Il s'agit de retracer, dans l'ordre chronologique, certaines étapes de l'histoire de la formation des Alpes à partir de documents de terrain. Après avoir exploité les indices de l'existence d'un océan alpin par le passé, la subduction est mise en évidence par l'étude des minéraux du métamorphisme. Enfin, le raccourcissement et l'épaississement crustal permettent de décrire la collision continentale ayant succédé à la fermeture océanique.

Proposition de corrigé

I. Le massif du Chenaillet : des lambeaux d'un océan disparu (Exploitation du document 1)

Dans le massif du Chenaillet, nous avons observé des péridotites métamorphisées (à 2 200 mètres), puis des gabbros et, à partir de 2 400 m, des basaltes en coussins. Il s'agit de roches de la lithosphère océanique, qui se trouvent normalement au fond des océans. Les ophiolites témoignent de la présence à l'emplacement actuel des Alpes d'un océan aujourd'hui disparu. On peut estimer que la mise en place de cette partie de lithosphère océanique date d'environ – 100 Ma.

II. Les métagabbros du mont Viso : témoins d'une subduction passée (Exploitation des documents 2 et 3)

En Italie, dans le massif du mont Viso, nous avons trouvé des échantillons de métagabbros, des gabbros d'une ancienne croûte océanique qui ont subi du métamorphisme. Ils contiennent des minéraux du métamorphisme : grenat, glaucophane et jadéite. L'étude du diagramme de stabilité montre que cette association correspond à une température d'environ 500 °C et une pression de 1 GPa. Il s'agit donc d'un métamorphisme haute pression – basse température –, caractéristique d'une zone de subduction.

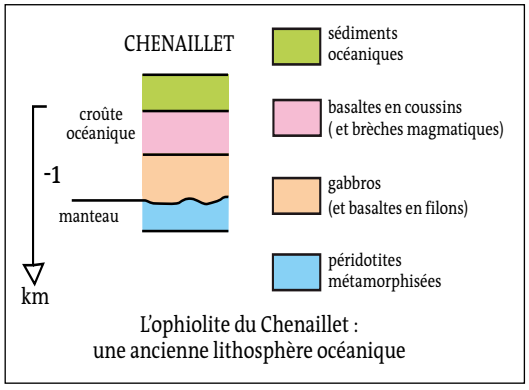
Ainsi les métagabbros du mont Viso témoignent d'une subduction passée de la lithosphère océanique de l'océan alpin.

III. Le chevauchement des rochers de Leschaux : indice d'une compression (Exploitation du document 4)

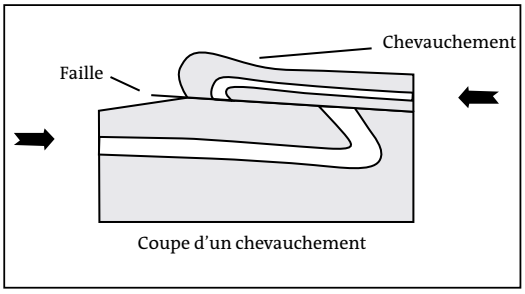
Enfin, nous sommes allés dans le massif des Bornes, où nous avons observé un contact anormal montrant un chevauchement du crétacé inférieur 2 sur l'unité formée du crétacé supérieur et du crétacé inférieur 2.

Cette déformation importante des roches résulte d'une tectonique en compression qui s'inscrit dans le cadre de la collision continentale, à l'origine de la surrection des Alpes.

De plus, nous avons observé dans les calcaires du crétacé inférieur 1 la présence de fossiles marins de rudistes (mollusques) et orbitolinidés (foraminifères), prouvant qu'ils se sont mis en place dans un domaine océanique.



L'ophiolite du Chenaillet : une ancienne lithosphère océanique



Coupe d'un chevauchement

Schéma du chevauchement indiquant les contraintes compressives

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 2 : – Établir un schéma-bilan du cycle des matériaux de la croûte continentale, avec ou sans documents.

Partie 2.1 : – Exploiter des documents et raisonner pour mettre en évidence le lien entre l'âge d'une lithosphère océanique, sa densité et la subduction.

Partie 2.2 : – Exploiter des données cartographiques, des images ou des données satellitales pour apprécier l'érosion d'un massif actuel.

ZOOM SUR...

LE DIAGRAMME DE STABILITÉ DES MINÉRAUX DU MÉTAMORPHISME

Il s'agit d'un graphique qui permet de visualiser dans quelles conditions de pression (donc de profondeur) et de température les minéraux peuvent exister.

Les domaines de stabilité des différents assemblages de minéraux sont déterminés expérimentalement en laboratoire, en les soumettant à des pressions et des températures croissantes dans des presses appelées « cellules à enclumes de diamant ». Ces outils permettent de couvrir pratiquement tout le domaine de pressions et de températures que l'on rencontre à l'intérieur de la Terre.

Le diagramme peut être découpé en faciès métamorphiques (schistes verts, schistes bleus, éclogites, etc.) qui n'indiquent pas la nature de la roche, mais les conditions de pression et de température qui font apparaître des associations minérales caractéristiques.

Ainsi, les minéraux du métamorphisme observés dans une roche permettent de reconstituer les conditions auxquelles cette roche a été soumise au cours de l'histoire de la chaîne de montagnes.

LE PRINCIPE DES « PRESSES À MINÉRAUX »

Les cellules à enclumes de diamant permettent de soumettre les minéraux à des pressions allant jusqu'à 500 gigapascals (GPa). Une pression correspond à une force par unité de surface. Le principe de cette technique repose ainsi sur l'application d'une force très importante sur la surface la plus réduite possible. Le diamant est utilisé à cette fin depuis les années 1950 pour ses propriétés de résistance exceptionnelles. En effet, les diamants se forment eux-mêmes à grande profondeur, c'est-à-dire à des pressions très élevées.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Népal est sous la menace d'un séisme encore plus puissant

L'instabilité de la région himalayenne est due à l'affrontement des plaques tectoniques indienne et eurasienne.

Le Népal est malheureusement coutumier des soubresauts destructeurs de la croûte terrestre. Alors que le pays est encore plongé dans le chaos après la violente secousse qui, samedi 25 avril, a ravagé la vallée de Katmandou, il vit sous la menace d'un séisme annoncé de beaucoup plus grande ampleur encore.

Cette extrême instabilité de la lithosphère a pour origine ce que les scientifiques nomment le « *méga-chevauchement himalayen* ». Il s'agit de l'affrontement entre, au sud, la plaque tectonique indienne et, au nord, la plaque eurasienne, dont le massif himalayen constitue la bordure. Le processus a commencé voilà quelque 100 millions d'années, lorsque le sous-continent indien s'est définitivement détaché du supercontinent Gondwana (qui réunissait autrefois l'Antarctique, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Australie et l'Inde), pour dériver vers le nord, en direction du continent asiatique.

C'est la collision titanesque entre les deux blocs continentaux, voilà un peu plus de 50 millions d'années, qui a donné naissance à la chaîne de l'Himalaya. Aujourd'hui, décrit Pascal Bernard, sismologue à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), la plaque indienne continue de s'enfoncer comme un coin, sur un plan incliné, sous la plaque eurasienne dont elle provoque l'élévation. Ce chevauchement, dont la vitesse s'est beaucoup réduite depuis le télescopage des deux masses continentales, se poursuit désormais à une vitesse de l'ordre de 2 centimètres par an.

« *Cette zone de contact, sur une immense faille qui court tout le long de la chaîne himalayenne, accumule d'*énormes tensions », explique le chercheur. Le Népal en particulier, au pied de l'Himalaya, se « *contracte* » en quelque sorte, chaque année, de 2 centimètres. Ce sont ces contraintes colossales qui se libèrent lors des ruptures de la faille. Voilà pourquoi la région himalayenne est la partie continentale du globe la plus exposée aux tremblements de terre, même si les zones de subduction proches des côtes, où se confrontent plaques océaniques et plaques continentales, peuvent engendrer des secousses plus violentes, comme au Chili ou au Japon.

C'est une telle rupture qui s'est produite samedi matin, avec le séisme de magnitude 7,8 dont l'épicentre était situé à environ 80 km au nord-ouest de la capitale népalaise et dont l'onde de choc s'est propagée, en une quarantaine de secondes, sur une distance de 150 km, dévastant la vallée de Katmandou. En dépit de la brutalité du phénomène, « *seule la partie profonde de la zone de contact a cassé, dans la partie centrale du Népal* », indique Pascal Bernard. Si bien qu'« *il reste des zones bloquées* » et qu'« *on peut craindre de nouvelles ruptures engendrant de nouveaux séismes, plus à l'est ou plus à l'ouest* ».

C'est ce qui s'est passé dimanche matin, avec une réplique de magnitude 6,7, dont l'épicentre était situé à l'est de Katmandou. Il faut s'attendre à des répliques « *qui peuvent être aussi puissantes, voire plus puissantes* », *et qui* « *pourraient survenir pendant plusieurs mois ou même plusieurs années* », prévient le sismologue.

Magnitude 8 en 1934

Le pire reste toutefois à venir. La secousse de samedi, bien que considérée comme un « *gros séisme* » par les spécialistes, est restée de plus faible importance que celle de 1934, de magnitude 8, qui avait semé la désolation dans les trois grandes villes de la vallée, Katmandou, Patan et Bakhtapour, en faisant entre 10 000 et 20 000 morts. En 1505, un autre tremblement de terre avait, lui aussi, atteint la même magnitude. Mais, souligne Pascal Bernard, « *nous estimons que la magnitude maximale qu'on peut attendre pour un séisme au Népal est de 8,5 à 9, soit une énergie trente fois supérieure à celle libérée par la secousse de samedi* ». Des indices géologiques laissent penser qu'un tel événement s'est produit dans les années 1100. Or, le temps de récurrence de ce genre de cataclysme est estimé « à un millier d'*années, avec une marge d'incertitude de 20 % ou 30 %* ». La conclusion est sans appel : « *A une échéance qui peut être celle du siècle ou de quelques siècles, le Népal n'*échappera pas à la catastrophe d'*un séisme géant.* » Et la menace vaut pour toute la bordure sud de l'Himalaya, Inde et Bangladesh compris.

Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 28.04.2015

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article explique le contexte géodynamique du Népal, à l'origine du séisme meurtrier du 25 avril 2015, de magnitude 7,8 et dont l'épicentre était à 80 km de Katmandou. En effet, la chaîne de l'Himalaya résulte de la collision entre les parties continentales de la plaque lithosphérique indienne et de la plaque lithosphérique eurasienne. L'Himalaya présente plusieurs chevauchements importants et la plaque indienne continue de s'enfoncer sous la plaque eurasienne. Les forces en jeu lors de la convergence des deux plaques sont responsables de l'accumulation de contraintes le long de ces chevauchements, qui peuvent être libérées brutalement lors de séismes potentiellement très violents. L'étude de l'accumulation des contraintes tectoniques montre qu'un séisme majeur, plus important que celui-ci d'avril 2015, aura certainement lieu dans le futur, mais les scientifiques ne sont malheureusement pas en capacité d'en prédire la date et la localisation précise.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Tremblements de terre en série sur la « ceinture de feu du Pacifique »

Les secousses qui ont ébranlé le Japon et l'Equateur ne sont pas reliées physiquement, même si elles sont dues à la forte sismicité de la région.

Le Japon, où le bilan provisoire est de 42 morts et plus d'un millier de blessés. L'Equateur, où les autorités font état d'au moins 272 morts et plus de 2 000 blessés. Les îles Tonga, touchées elles aussi... Il est naturel de se demander si les multiples séismes survenus ces derniers jours sont reliés entre eux, comme dans une réaction en chaîne. Pourtant, ce n'est, d'un point de vue physique, ou mécanique, pas le cas.

Certes, tous ont pour origine la très forte activité sismique et volcanique de la zone Pacifique. *« Environ 80 % des volcans émergés de la planète sont localisés dans les zones de subduction tout autour de l'océan Pacifique »*, rappelle Patrick Allard, géophysicien à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). Ce qu'on appelle « la ceinture de feu du Pacifique ». Tous aussi mettent en jeu la plaque tectonique pacifique, au sens large. Pour autant, les secousses qui ont ébranlé le Japon n'ont pas entraîné celle qui a mis à mal l'Equateur, à près de 15 000 kilomètres de distance.

Energie trente fois supérieure

Dans un premier temps, jeudi 14 avril, à 21 h 26 (heure locale), l'île japonaise de Kyushu, dans le sud-ouest de l'archipel, a été frappée par un tremblement de terre de magnitude 6,2, selon l'US Geological Survey (USGS), l'agence américaine chargée de la surveillance de l'activité sismique. Il a été suivi de plus de cinq cents répliques, dont l'une, samedi 16, à 1 h 25, a atteint une magnitude de 7. Ce qui lui donnait un potentiel beaucoup plus destructeur que la première, un point de magnitude correspondant à une énergie trente fois supérieure. De ce fait, les spécialistes ont transformé la secousse initiale en « précurseur » de cette réplique, qui l'a dépassée en importance.

Tous ces événements mettent en jeu une faille géologique qui traverse l'île de Kyushu. Elle est distincte de la faille principale associée aux deux grandes plaques tectoniques pacifique et eurasienne, et dont la cassure avait provoqué, le 11 mars 2011, au large des côtes de l'île de Honshu – la plus grande du Japon – le séisme de magnitude 9 et le tsunami qui furent suivis de la catastrophe nucléaire de Fukushima. Il s'agit cette fois, explique Pascal Bernard, sismologue à l'IPGP, d'une *« faille secondaire qui court le long du Japon »*. C'est elle qui avait déjà cassé en janvier 1995 à Kobe, faisant plus de six mille morts.

Dans cette zone, la plaque tectonique philippine, un morceau de lithosphère coincé entre les plaques pacifique et eurasienne, s'enfonce, par subduction, sous une autre petite plaque, celle de l'Amour, rattachée à la plaque eurasienne. C'est cet affrontement qui est à l'origine des ruptures enregistrées ces derniers jours. Les très importants dégâts matériels subis, dans un pays aussi bien préparé aux séismes que le Japon, s'expliquent par le fait que la faille qui a cassé est superficielle, c'est-à-dire qu'elle traverse la partie supérieure de la croûte terrestre.

« On peut fortement limiter les dégâts avec des constructions parasismiques. Mais, quand vous avez un séisme de magnitude 7 sous vos pieds, les bâtiments anciens, ou ceux qui sont moins bien consolidés, ont beaucoup de mal à résister », commente Patrick Allard.

L'Equateur, lui, a été victime, samedi 16 avril, à 18 h 58, d'un violent séisme, de magnitude 7,8, selon l'USGS. Il s'agit ici, explique Pascal Bernard, de la subduction de la plaque de Nazca sous la plaque sud-américaine. *« Dans cette zone*, décrit le chercheur, *les deux masses tectoniques se rapprochent à la vitesse de cinq centimètres par an, leur affrontement créant des contraintes et des déformations qui se libèrent par des séismes fréquents. »*

Une « pichenette finale »

Le dernier très grand tremblement de terre enregistré dans cette région est celui de 1906, de magnitude 8,8, qui avait déclenché un tsunami et causé plus d'un millier de morts. Mais beaucoup d'autres, de moindre ampleur, se sont produits au cours du siècle passé. *« Depuis 1906, les deux plaques se sont rapprochées d'environ cinq mètres, et l'on savait que cette zone allait casser »*, précise le sismologue. Mais les secousses ressenties au Japon, dans l'ouest du Pacifique, n'ont pas de lien de cause à effet avec celle qui a frappé l'Equateur, dans l'Est. Il ne faut pas imaginer que l'onde de choc provoquée par les premières ait pu déstabiliser la partie orientale de la plaque pacifique. *« Tout au plus s'agit-il d'une pichenette finale, comme un caillou qui serait lancé sur une falaise déjà sur le point de s'écrouler »*, dit par comparaison Pascal Bernard.

Quant au séisme de magnitude 5,8 qui a touché dimanche 17 avril les îles Tonga, dans le Pacifique sud, il est, lui aussi, physiquement indépendant des autres. Cet archipel, situé dans la ceinture de feu du Pacifique, est soumis à une sismicité et un volcanisme permanents.

La terre n'a sans doute pas fini d'être agitée de convulsions dans cette grande région. *« Il faut s'attendre à de nouvelles répliques, dans les semaines, voire les mois à venir,* annonce Pascal Bernard. *La question est de savoir si elles peuvent être encore plus importantes. Les derniers jours ont montré, au Japon, qu'une réplique peut être supérieure à son précurseur. Y aura-t-il des secousses encore plus importantes ? La probabilité est faible, mais elle existe. »*

Pierre Le Hir, *Le Monde* daté du 19.04.2016

POURQUOI CET ARTICLE ?

En avril 2016, à un jour d'écart, deux séismes ont frappé la zone Pacifique, l'un a touché le Japon tandis que l'autre a affecté l'Équateur. **Cet article explicite le cadre géodynamique dans lequel s'inscrit la forte activité sismique de la zone Pacifique et établit que ces deux séismes de 2016, quoique quasiment concomitants, sont indépendants l'un de l'autre**. En effet, ces deux séismes sont liés à la subduction de différentes plaques de la zone Pacifique. Or, l'affrontement entre les plaques impliquées dans la subduction entraîne l'accumulation de fortes contraintes, qui peuvent être à l'origine de ruptures brutales le long de failles. Ainsi, c'est toute la ceinture de feu du Pacifique qui présente une forte sismicité. Mais les séismes du Japon et de l'Équateur de 2016 résultent des mouvements de plaques différentes et ne sont donc pas directement liés d'un point de vue géodynamique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

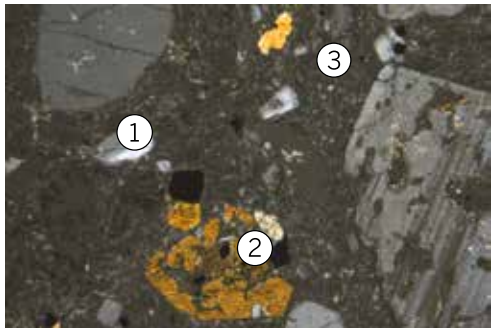
Les océans peuvent être bordés par des marges actives, correspondant à des zones au niveau desquelles la lithosphère océanique plonge dans l'asthénosphère. Les zones de subduction sont le siège d'une importante activité magmatique qui aboutit à la production de croûte continentale par des mécanismes liés aux transformations minéralogiques de la plaque plongeante.

Un volcanisme explosif

Les zones de subduction présentent une importante activité volcanique et sismique : ce sont des marges dites « actives ». Les volcans se situent sur la plaque lithosphérique chevauchante et sont alignés parallèlement à la fosse océanique. **L'activité volcanique des zones de subduction est caractéristique : les laves émises sont visqueuses**, car riches en silice et de température assez faible. Elles s'écoulent difficilement et bouchent la cheminée du volcan. **Les gaz, issus du dégazage du magma lors de sa remontée, s'accumulent dans ces laves, exercent une pression de plus en plus importante qui finit par être à l'origine d'explosions violentes** donnant des coulées pyroclastiques et des nuées ardentes.

Des zones d'accrétion continentale

Les roches issues du magmatisme des zones de subduction peuvent présenter des compositions chimiques proches, mais sont de deux types :
– des **andésites**, roches associées au volcanisme explosif, qui contiennent des phénocristaux, dont de nombreux feldspaths plagioclases ;
– des **granodiorites**, roches plutoniques formées de quartz, feldspaths plagioclases, micas et amphiboles, faisant partie des granitoïdes.
Une grande partie des magmas cristallisent en profondeur sous la forme de granitoïdes, que l'érosion finit par mettre à jour. Ces roches forment donc de la nouvelle croûte continentale : on parle d'**accrétion continentale**.



Une lame mince d'andésite observée au microscope en lumière polarisée-analysée
1. feldspath plagioclase
2. amphibole
3. pâte microlitique

L'origine des magmas

L'étude de la composition chimique des granitoïdes montre qu'ils sont issus du **refroidissement d'un magma d'origine mantellique**. Cela suggère une fusion partielle des péridotites à l'aplomb des zones d'activité volcanique, c'est-à-dire dans le manteau de la plaque chevauchante.

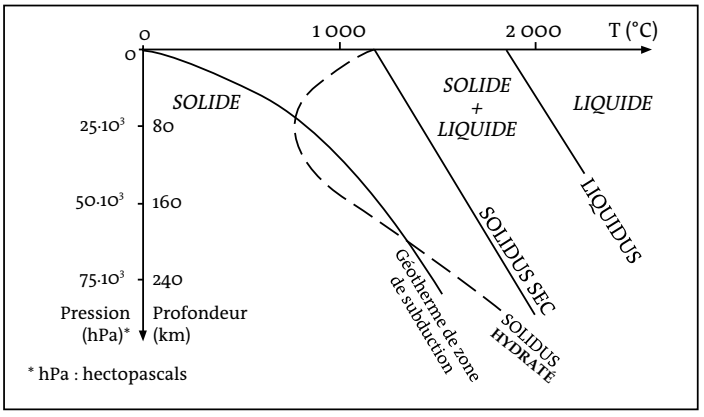


Diagramme pression/température, d'après *Comprendre et enseigner la planète Terre*, Caron-Ophrys

MOTS CLÉS

ACCRÉTION CONTINENTALE
Formation de nouvelle croûte continentale au niveau des zones de subduction. Les roches se forment par cristallisation du magma, issu de la fusion partielle des péridotites hydratées du manteau de la plaque chevauchante.

SUBDUCTION
Plongement d'une lithosphère océanique dans l'asthénosphère située sous une autre plaque, elle-même constituée de lithosphère océanique ou continentale. Une zone de subduction constitue une limite de plaque caractérisée par la présence d'une fosse océanique et une activité sismique et volcanique.

NOTIONS CLÉS

ROCHES MAGMATIQUES
• Les roches plutoniques comme la granodiorite et le granite proviennent du refroidissement lent du magma en profondeur (pendant plusieurs dizaines de milliers d'années). Les minéraux ont le temps de cristalliser : la structure est dite « grenue » (grains visibles à l'œil nu).
• Les roches volcaniques, comme l'andésite, proviennent du refroidissement rapide du magma à la surface. La structure est dite « microlitique » (ou vitreux) : des cristaux sont noyés dans un verre, qui correspond au magma dont les atomes n'ont pas eu le temps de s'ordonner en cristaux.

PHÉNOCRISTAUX
Désignent dans une roche volcanique les cristaux de grande taille, visibles à l'œil nu.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

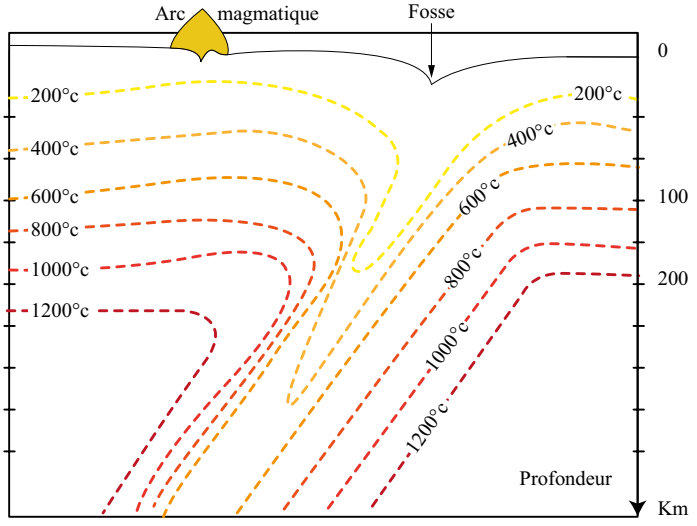
Or les conditions de pression et de température qui règnent au niveau des zones de subduction ne permettent pas d'envisager une fusion partielle des péridotites (le solidus ne recoupe pas le géotherme), à moins que celles-ci ne soient hydratées.

L'origine de l'eau et l'origine du magmatisme en zone de subduction

Depuis sa formation au niveau de la dorsale, la lithosphère océanique qui entre en subduction s'est hydratée : elle est riche en **minéraux hydroxylés** (OH^-). Entraînées en profondeur, les roches subissent un métamorphisme de haute pression mais à basse température, la subduction étant plus rapide que le réchauffement de la lithosphère. Les minéraux caractéristiques de la subduction (glaucophane, jadéite, grenat) sont moins riches en eau : les réactions caractéristiques du métamorphisme de haute pression / basse température entraînent une libération d'eau. Elle percole dans le manteau de la plaque chevauchante et abaisse la température de fusion des péridotites. Entre 80 et 180 km de profondeur, le « solidus hydraté » croise le géotherme de subduction : il y a **fusion partielle** et **production de magma**. Le magma ainsi produit alimente les volcans des zones de subduction, ce qui donne des andésites et forme également des plutons de granitoïdes en profondeur.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Mieux prévoir quand un volcan s'éveillera p. 54**
(Guillaume Rizza, *Le Monde* daté du 31.01.2018)



Modèle en coupe de tracé des isothermes (lignes d'égale température) dans une zone de subduction

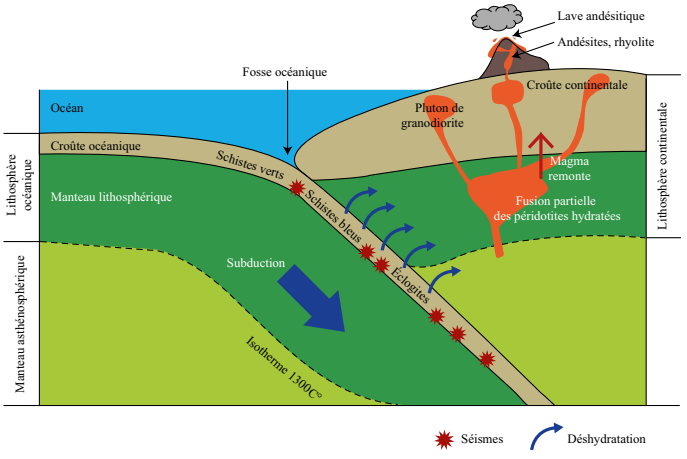


Schéma bilan de l'origine du magmatisme en zone de subduction

ZOOM SUR...

L'ACTIVITÉ SISMIQUE DES ZONES DE SUBDUCTION

Au niveau des zones de subduction, des séismes à foyers profonds sont enregistrés (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de profondeur). Les foyers des séismes sont alignés le long du plan de Wadati-Benioff, qui matérialise la plaque plongeante.

L'ÉVOLUTION DE LA LITHOSPHÈRE OCÉANIQUE

Au cours de l'expansion océanique, la déformation est cassante, la croûte océanique se fracture. Les fracturations permettent à l'eau de mer très froide de pénétrer.
Elle ressort à haute température (350 °C) au niveau de cheminées hydrothermales (fumeurs noirs). On parle de « circulation hydrothermale ».
Le flux thermique de la lithosphère diminue avec l'âge : en s'éloignant de l'axe de la dorsale, la lithosphère océanique refroidit.
La diminution de la température et la circulation d'eau sont à l'origine de changements minéralogiques au sein des roches de la lithosphère océanique. Les nouveaux minéraux sont « hydratés » : ils possèdent dans leur formule chimique des radicaux hydroxyles OH^-. Ils sont stables à basse température.
À la place des feldspaths plagioclases et pyroxènes du basalte et du gabbro, on trouve des amphiboles, de la chlorite et de l'actinote (faciès schistes verts). Les péridotites sont serpentinisées : on constate l'apparition de la serpentine, au détriment de l'olivine et des pyroxènes.
Il s'agit d'un métamorphisme à basse pression / basse température (BP-BT).
C'est donc une lithosphère océanique froide, dense et hydratée qui entre en subduction.

LES RÉACTIONS DU MÉTAMORPHISME HP-BT AU COURS DE LA SUBDUCTION

(1) plagioclase + chlorite* + actinote* → glaucophane **+ eau (faciès schiste bleu)**
(2) plagioclase + glaucophane → grenat + jadéite **+ eau (faciès éclogite)**
** Chlorite et actinote sont des minéraux hydratés.*

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.2 : Modélisation de la formation des croûtes continentales primitive et actuelle

L'intitulé complet du sujet

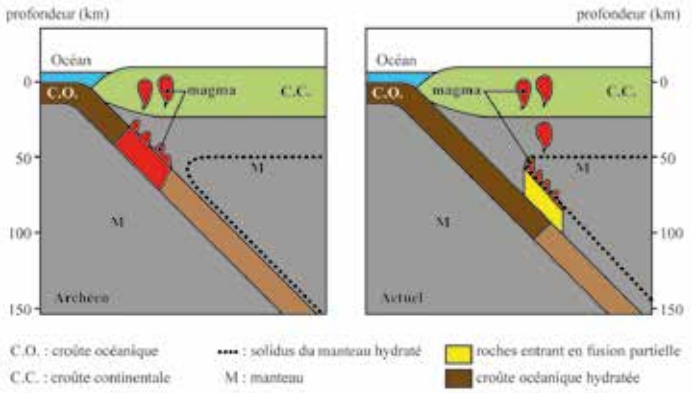
À l'Archéen, période comprise entre – 4 et – 2,5 milliards d'années, la Terre, beaucoup plus chaude, était le siège d'une activité magmatique intense, qui a donné naissance à la majeure partie de la croûte continentale actuelle.

Notre planète s'est ensuite progressivement refroidie, ce qui a entraîné des changements dans la source et dans les mécanismes de production de la croûte continentale.

Comparez les deux modèles de formation de la croûte continentale primitive et actuelle, au niveau d'une zone de subduction, puis discutez de la validité de chacun d'entre eux.

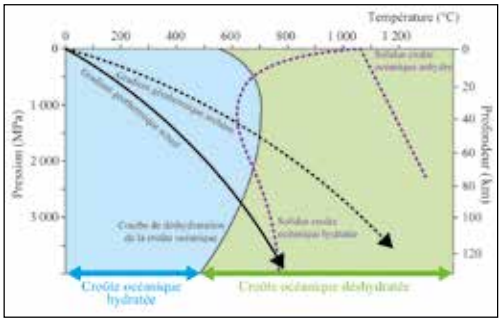
Les documents

Document 1 : Modèles de genèse de la croûte continentale archéenne et actuelle



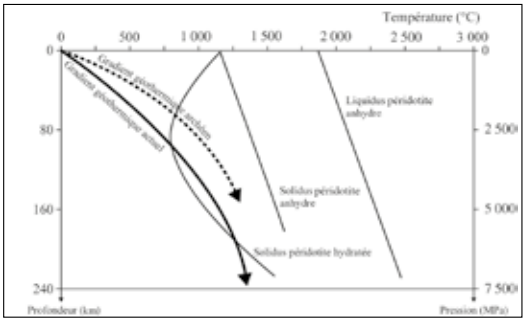
Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

Document 2 : Conditions de fusion de la croûte océanique anhydre et hydratée et gradients géothermiques dans une zone de subduction actuelle et archéenne



Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

Document 3 : Conditions de fusion d'une péridotite anhydre et hydratée et gradients géothermiques dans une zone de subduction actuelle



Source : d'après Hervé Martin et Jean-François Moyen, *Geology*, 2002

L'analyse du sujet

Le sujet présente deux modèles de formation de la croûte continentale au niveau des zones de subduction : l'un à l'Archéen (– 4 à – 2,5 Ga) pour la formation de la croûte continentale primitive, l'autre actuel à l'origine de la croûte continentale nouvellement formée. La question est clairement structurée en deux parties. Il s'agit d'abord de comparer les deux modèles de formation de la croûte continentale, puis de discuter de la validité de ces modèles à partir de l'étude des conditions de fusion des roches de la croûte océanique et des péridotites mantelliques au niveau des zones de subduction archéennes et actuelles.

ZOOM SUR…

LA DÉCOUVERTE DES ZONES DE SUBDUCTION

Plusieurs années avant l'élaboration du modèle de la tectonique des plaques par le Français Xavier Le Pichon et ses collaborateurs (1968), le sismologue américain Hugo Benioff a redécouvert et généralisé les travaux du Japonais Wadati. Ce dernier avait lié séismes et volcans japonais à la « dérive des continents » dès 1935, alors que les idées de Wegener étaient encore refusées. Benioff a constaté que dans ces régions à la sismicité et au volcanisme parfois spectaculaires les tremblements de terre étaient localisés sur un plan plongeant, qui sera alors baptisé « plan de Wadati-Benioff ». Certains séismes se localisent à des profondeurs si importantes qu'il ne devrait pas y avoir de déformation cassante en raison des températures élevées qui rendent les matériaux ductiles. Les études menées dans les années 1950 ont montré que ces régions coïncidaient aussi avec des fosses sous-marines très profondes. Dans les années 1960, des chercheurs américains ont montré que le plan de Wadati-Benioff correspondait à une plaque plongeante de lithosphère océanique froide et suffisamment rigide pour se casser, provoquant les séismes.

PERSONNAGES CLÉS

LES « DIABLES DES VOLCANS »

Maurice et Katia Krafft sont des volcanologues français, nés en 1946 et 1942, ayant œuvré dans le monde entier pour la prévention des risques volcaniques auprès des populations. Ils ont sans doute contribué à sauver des centaines de milliers de vies humaines, comme celles des 300 000 personnes ayant accepté d'évacuer la zone du Pinatubo aux Philippines après avoir vu un de leurs films. Ironie du sort, le volcan entra en éruption quelques jours après la mort du couple, emporté par une nuée ardente sur le mont Unzen au Japon le 3 juin 1991.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La principale difficulté de ce sujet réside dans la lecture correcte des diagrammes pression-température pour déterminer les conditions de formation du magma à l'origine de la croûte continentale au niveau des zones de subduction.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Rédiger la réponse sans tenir compte des deux parties indiquées dans l'énoncé.
• Ne pas mettre en relation les documents 2 et 3 pour discuter de la validité des deux modèles proposés.

Proposition de corrigé

La majeure partie de la croûte continentale se forme au niveau des zones de subduction, caractérisées par le plongement d'une lithosphère océanique dans l'asthénosphère. À l'Archéen (– 4 à – 2,5 Ga), la production de la croûte continentale, dite primitive, fut intense. Quels sont les modèles expliquant la formation des croûtes continentales primitive et actuelle ? Quelle est la validité de chacun de ces deux modèles ?

Pour répondre à ces problématiques, nous comparerons d'abord le modèle de formation de la croûte continentale à l'Archéen et celui de formation de la croûte continentale actuelle. Puis, nous déterminerons dans quelle mesure les conditions de fusion des roches de la croûte océanique et des péridotites mantelliques dans les zones de subduction passée et présente permettent de valider les modèles de formation de la croûte continentale.

D'après le modèle de formation de la croûte continentale à l'Archéen, les roches de la croûte océanique hydratée de la lithosphère plongeante entrent en fusion partielle à des profondeurs comprises entre 40 km et 70 km, permettant ainsi l'activité magmatique des zones de subduction (document 1). Selon le modèle actuel de formation de la croûte continentale, les péridotites hydratées du manteau situées sous la croûte continentale de la plaque chevauchante entrent en fusion partielle lorsqu'elles sont localisées entre 60 km et 100 km, entraînant la formation de la croûte continentale (document 1).

À l'Archéen, l'intersection du gradient géothermique des zones de subduction avec le solidus de la croûte océanique hydratée montre l'existence une zone de fusion partielle entre 45 à 55 km de profondeur. À ces profondeurs, les roches de la croûte océanique sont encore hydratées, rendant possible leur fusion partielle. Au-delà de 55 km de profondeur, la déshydratation de ces roches empêche leur fusion partielle (document 2). À l'Archéen, le gradient géothermique croise le solidus de la péridotite hydratée vers 800 °C à 60 km (document 3). On sait que l'eau responsable de l'hydratation des péridotites peut provenir de la déshydratation de la croûte océanique sous-jacente. Or, avant d'atteindre 800 °C vers 60 km, les roches de la croûte océanique étaient déjà déshydratées à l'Archéen, ne pouvant plus céder d'eau aux péridotites sus-jacentes (document 2). Ainsi, la fusion partielle de ces péridotites demeurées anhydres n'était pas possible à l'Archéen.

Dans les zones de subduction actuelles, le gradient géothermique croise le solidus des péridotites hydratées vers 90 km de profondeur à une température de 800 °C, permettant la fusion partielle de ces péridotites dans ces conditions (document 3). De plus, le gradient géothermique actuel ne croise pas le solidus de la croûte océanique hydratée dans la zone où ces roches sont hydratées (document 2). La croûte océanique actuelle ne rentre donc pas en fusion partielle car sa température est trop faible. La croûte océanique reste donc hydratée jusqu'à au moins 90 km, profondeur à laquelle elle se déshydrate. L'eau de faible densité par rapport aux roches environnantes migre vers les péridotites du manteau sus-jacent, provoquant la fusion partielle de ces péridotites, qui forment un magma à l'origine des roches magmatiques de la croûte continentale. Ainsi, les modèles de formation des croûtes continentales primitive et actuelle au niveau des zones de subduction sont validés. La croûte continentale primitive a pour origine la fusion partielle de la croûte océanique hydratée plongeante tandis que la croûte continentale actuelle est formée à partir de la fusion partielle des péridotites hydratées du manteau. Dans les deux modèles, l'hydratation de la croûte océanique plongeante permet la fusion partielle des roches, à l'origine de l'accrétion continentale. La dissipation de l'énergie géothermique au cours des temps géologiques est à l'origine des différences constatées entre les modèles de formation des croûtes continentales primitive et actuelle.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Partie 1, synthèse sans documents :
– Montrer comment la transformation des roches, qui survient lors de la plongée de la lithosphère océanique, est à l'origine du magmatisme caractéristique des zones de subduction. Schémas attendus.
Partie 2.2 :
– Exploiter des documents pour montrer qu'une région correspond bien à une zone de subduction.

ZOOM SUR…

LES ÉRUPTIONS EXPLOSIVES

L'accumulation d'une forte pression dans la chambre magmatique d'un volcan dont les magmas sont visqueux peut déclencher une éruption explosive. Les nuées ardentes qui peuvent en résulter sont très destructrices, et le panache de cendres peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

QUELQUES ÉRUPTIONS MARQUANTES :

– le Vésuve en l'an 79 ;
– le Krakatoa en Indonésie en 1883 ;
– la montagne Pelée à la Martinique en 1902 ;
– le mont Saint Helens aux États-Unis en 1980 ;
– le Nevado del Ruiz en Colombie en 1985 ;
– le Pinatubo en 1991 aux Philippines ;
– le Merapi en 2010 en Indonésie.

UNE VILLE RAYÉE DE LA CARTE

Le 8 mai 1902 à la Martinique, la ville de Saint-Pierre disparaît en quelques minutes au cours de l'éruption explosive de la montagne Pelée. 28 000 victimes et seulement 2 survivants : un lourd bilan lié à la minimisation du danger par les autorités, malgré les signaux d'alerte. Fumerolles, explosions, tremblements de terre, panaches de vapeur et de cendres… sont autant de manifestations témoignant de l'imminence d'une éruption. Le 7 mai, le volcan est calme et une commission scientifique a déclaré qu'il n'y avait pas de risque.

Le terme « nuée ardente » a été introduit suite à l'éruption de la montagne Pelée.

Depuis, la surveillance des volcans, en particulier ceux des Antilles françaises, s'est développée autour d'observatoires volcanologiques. Mais dans différentes régions du globe, les recommandations de mesures préventives des scientifiques se sont souvent heurtées aux décisions politiques et aux intérêts économiques, avec des conséquences parfois dramatiques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Mieux prévoir quand un volcan s'éveillera

L'analyse de microcristaux dans la lave pourrait permettre d'anticiper les éruptions en évaluant le temps de montée du magma jusqu'au cratère du volcan.

L'un des volcans les plus actifs des Philippines, le Mayon, est entré en activité. Il crache des fontaines de lave et d'importantes colonnes de fumée, obligeant des dizaines de milliers d'habitants à fuir par précaution, face à un risque d'explosion difficile à prévoir…

Une situation qui rappelle, toutes proportions gardées, l'affaire de la Soufrière, ce volcan de Guadeloupe qui avait vu deux « figures » s'opposer à l'été 1976 : Claude Allègre, qui demandait l'évacuation de la population et affirmait alors dans *Le Monde* (daté du 1er septembre 1976) qu'il n'existait *« aucune méthode scientifique connue capable de prévoir à coup sûr (…) une éruption volcanique »*, et Haroun Tazieff minimisant le risque d'éruption. Ce dernier eut finalement raison, sans que l'on sache si cela relevait du coup de poker ou d'une analyse rigoureuse. Tous deux s'appuyaient sur une science florissante mais fragile, celle de la prévision et de l'anticipation des éruptions.

Enormes progrès

Quatre décennies plus tard, une étude publiée le 23 janvier dans *Nature Communications* entend contribuer à cette science qui « *a fait depuis d'*énormes progrès », selon Jacques-Marie Bardintzeff, volcanologue à Paris-Sud qui n'est pas auteur de l'étude. Menée par deux chercheurs du département de géologie du Trinity College de Dublin, elle s'intéresse à une piste relativement peu explorée jusqu'alors, celle du suivi de cristaux anhydres, constituants essentiels des roches magmatiques, les pyroxènes, dans leur formation et leur ascension lors d'une éruption volcanique.

La publication permet en outre de mieux comprendre le processus de recharge de la chambre magmatique, ce phénomène antérieur à l'éruption, pendant lequel le réservoir du volcan à l'aplomb du cratère se charge en magma.

Selon la docteure Teresa Ubide, l'une des deux auteurs de l'étude, *« la composition des pyroxènes analysée au laser permet de reconstituer le processus qui survient juste avant que n'ait lieu l'éruption »*. Les chercheurs ont étudié sur une période allant de 1974 à 2014 la composition de cristaux issus des éruptions du célèbre volcan de l'Etna, qui surplombe la cité baroque de Catane, en Sicile (Italie).

Les pyroxènes prélevés présentent une couronne riche en chrome, qui traduit la recharge magmatique en profondeur. Une autre zone du cristal est pauvre en chrome et correspond à la phase de montée du magma dans la cheminée du volcan. L'étude de ces parties (composition, épaisseur) permet d'estimer le temps passé dans le réservoir magmatique et celui dans la cheminée qui mène au cratère, et par déduction la vitesse de montée.

Une donnée d'autant plus intéressante que suivre une éruption volcanique est une mission des plus délicates : la méthode la plus répandue consiste à enregistrer les légères secousses qui traduisent des séismes volcano-tectoniques dans le réservoir du volcan. Quand le magma se situe à une profondeur détectée par cette technique, la technique de la sismologie se heurte à la question suivante : à quel moment le magma va-t-il jaillir du cratère ?

La publication pourrait apporter des éléments de réponse puisqu'elle estime la vitesse de montée du magma, et donc le délai avant l'éruption. Le professeur Bardintzeff abonde : *« La publication vient en complément de la mesure des microséismes observés qui renseignent sur la profondeur à laquelle le magma se trouve »*.

Nouvelle technique

Pour la suite, les chercheurs ambitionnent *« d'appliquer cette nouvelle technique aux cristaux d'autres volcans en activité ou même endormis, pour apprendre sur l'efficacité du processus de recharge du magma et le temps avant éruption »*.

Une visée plus ambitieuse que l'étude présentée à la conférence annuelle de Goldschmidt en 2016, réunion des spécialistes du monde de la géochimie. Cette publication, de nature plus qualitative, étudiait le zonage de plagioclases et non de pyroxènes. Or ces derniers jouent un meilleur rôle de « *mémoire active* » du volcan, car ils contiennent des éléments à l'état de traces tels que le chrome ou le scandium. *« Ces éléments très faiblement présents chimiquement s'avèrent être de très bons indicateurs »*, comme le souligne la docteure Ubide.

*« Cet article prometteur permet de mieux comprendre le comportement du magma depuis le réservoir jusqu'*à l'éruption en surface. Mais pour l'*instant, il n'a pas vocation à une prévision exacte des éruptions, c'est d'ailleurs l'honnêteté du papier que de reconnaître les incertitudes de mesure »*, précise Jacques-Marie Bardintzeff.

L'enjeu est donc de créer *« un nouveau protocole »* plus précis consistant à affiner la vitesse de montée du magma (estimée entre 60 et 600 mètres par heure pour l'Etna) : les pyroxènes prélevés issus d'éruptions passées permettront de mieux comprendre la phase de remontée du magma. Une information précieuse, qui pourrait aider à la prise de décision lors de futures éruptions.

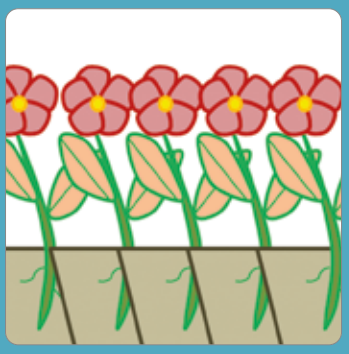
Guillaume Rizza, *Le Monde* daté du 31.01.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les éruptions des volcans, notamment de ceux de type explosif des zones de subduction, sont difficilement prévisibles. Pourtant, cette prédiction est importante pour décider des mesures de protection des populations habitant dans les zones à risque. Généralement, plusieurs méthodes, dont l'étude sismique de la région volcanique, sont combinées pour évaluer le risque de la survenue d'une éruption. **Cet article présente une nouvelle méthode d'évaluation du risque volcanique, fondée sur l'étude de certains minéraux, notamment les pyroxènes, constitutifs des roches magmatiques.** La caractérisation de ces minéraux présents dans les laves permet d'estimer la vitesse de remontée du magma et de suivre la recharge de la chambre magmatique du volcan. Cette méthode ne permet pas de prédire à coup sûr la survenue d'une éruption, mais elle peut contribuer à mieux suivre sa dynamique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

ENJEUX PLANÉTAIRES CONTEMPORAINS



© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

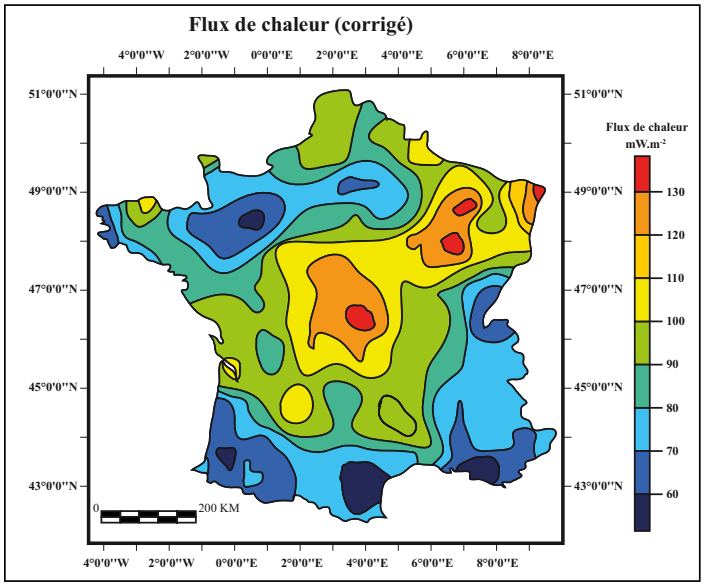
Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

La grande majorité de l'énergie actuellement utilisée (agriculture, industrie, transport, etc.) provient soit de la combustion d'énergies fossiles, comme le pétrole ou le charbon, soit du nucléaire. Or, les énergies fossiles ne sont pas renouvelables et pourraient manquer dans l'avenir. De plus, leur combustion, en faisant augmenter le niveau de CO_2 dans l'atmosphère, est à l'origine d'un effet de serre entraînant une augmentation de la température terrestre. Avec l'énergie nucléaire se posent le problème de sa sûreté et celui de la gestion des déchets à long terme. Le développement durable s'intéresse à d'autres filières énergétiques, plus respectueuses de l'environnement et quasiment inépuisables pour l'homme, comme la géothermie. Où et comment est exploitée l'énergie géothermique et quelle est son origine ?

Flux et gradient géothermiques

À la surface de la Terre, de nombreuses manifestations témoignent de l'existence de **matériaux chauds** en profondeur : éruptions volcaniques, sources chaudes hydrothermales, augmentation de la température dans les mines, etc. Des sources d'eau chaude, comme à Chaudes-Aigues dans le Massif central, sont utilisées depuis l'Antiquité, alors que les premières mesures de flux géothermique ont été réalisées, en France, dans les années 1960. Le **flux géothermique** correspond au produit du gradient géothermique vertical par la conductivité thermique des roches. Le flux géothermique et le **gradient géothermique** sont mesurés sur chaque site d'étude, tandis que la conductivité thermique des roches est déterminée en laboratoire.

Les valeurs des gradients et des flux géothermiques varient selon **le contexte géodynamique.** En domaine océanique, les flux géothermiques sont élevés au niveau des **dorsales océaniques**, des **points chauds** (île de La Réunion, par exemple) et des **arcs volcaniques** ou **cordillères** liés à la subduction (Japon, Andes, Antilles, etc.). En domaine continental, les flux géothermiques sont forts au niveau des zones avec magmatisme (vallée du rift africain). De plus, des bassins sédimentaires ayant une croûte amincie présentent un flux géothermique élevé, tels les bassins d'effondrement de l'Alsace ou de la Limagne en France. Quelle est l'origine de cette énergie thermique observable en surface ?



Le flux géothermique en France (obtenu à partir de 479 mesures et complété par des mesures en mer et dans les pays limitrophes, d'après Lucazeau et Vasseur, 1989)

L'origine de l'énergie géothermique et les transferts thermiques dans la Terre

L'énergie géothermique interne provient essentiellement de **la désintégration des éléments radioactifs** (uranium : ^{238}U et ^{235}U ; thorium : ^{232}Th ; potassium : ^{40}K) présents dans les roches des différentes enveloppes du globe.

CHIFFRES CLÉS

En 2010, la France a consommé 266 Mtep (1 Mtep = 1 million de tonnes d'équivalent pétrole, soit l'énergie dégagée par un million de tonnes de pétrole). En quarante ans, la consommation énergétique de la France a presque doublé mais se stabilise depuis quelques années. Ses besoins énergétiques sont couverts par le pétrole (30,9 %), le charbon (4,1 %), le gaz naturel (15,0 %), l'électricité d'origine nucléaire (41,8 %) et l'ensemble des énergies renouvelables (8,2 %, énergies hydraulique, éolienne, photovoltaïque, géothermique, issue de la valorisation des déchets, etc).

MOTS CLÉS

CONDUCTION
Transfert d'énergie thermique de proche en proche sans déplacement de matière sous l'effet d'une agitation des atomes.

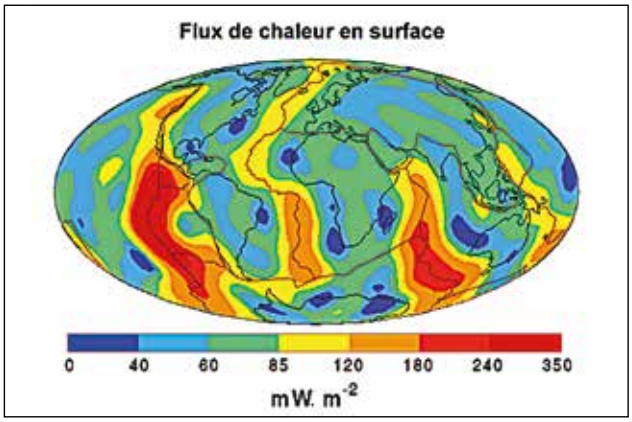
CONVECTION
Transfert d'énergie thermique avec déplacement de matière sous l'effet de différences de densité et de température et qui constitue un mécanisme de transfert d'énergie efficace.

FLUX GÉOTHERMIQUE
Quantité d'énergie thermique dissipée par unité de surface terrestre et par unité de temps (unité : $W.m^{-2}$). **Le flux géothermique** moyen est de l'ordre de 87 $mW.m^{-2}$. En général, il est plus faible sur les continents (~ 65 $mW.m^{-2}$) que sur les océans (~ 100 $mW.m^{-2}$).

GRADIENT THERMIQUE
Augmentation de la température avec la profondeur à l'intérieur du globe. Le gradient géothermique moyen est de l'ordre de 30°C.km^{-1}.

MACHINE THERMIQUE
La Terre produit de l'énergie sous forme de chaleur et la transfère par convection en la transformant en mouvement avant de l'évacuer par conduction.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



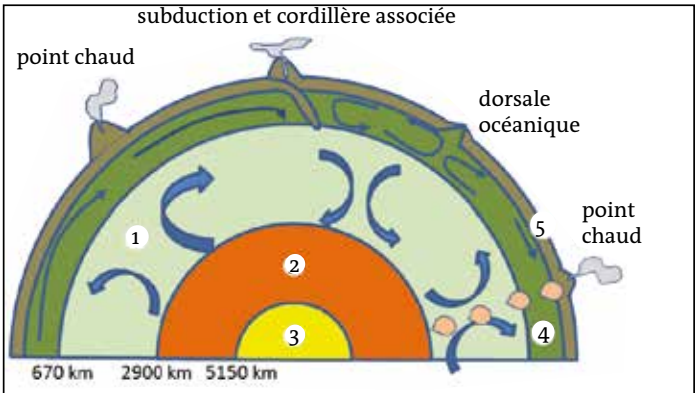
Le flux géothermique mondial

L'énergie thermique produite dans la Terre est transférée dans le globe selon deux modalités : **la conduction** et **la convection**. L'efficacité du transfert thermique de la conduction dépend de la conductivité thermique des matériaux.

Ainsi au sein de la lithosphère et à l'interface noyau/ manteau, l'énergie thermique est transférée par conduction. Par exemple, dans la croûte terrestre, le gradient géothermique moyen est de 30 °C.km^{-1}. La convection se met en place lorsqu'un matériau chaud et peu dense est situé sous un matériau plus froid et plus dense. Le matériau chaud et peu dense s'élève, tandis que le matériau froid et plus dense descend et se réchauffe à son tour. Ces mouvements de matière constituent des **cellules de convection** qui existent dans le manteau et le noyau. Le manteau est ainsi animé de mouvements lents de convection, qui entraînent le déplacement des plaques lithosphériques situées au-dessus. Le fort flux géothermique dans les dorsales s'explique par la remontée de matériel chaud et la production de lithosphère océanique nouvelle. Dans **les zones de subduction**, la faible valeur du flux géothermique moyen s'explique par le plongement de la lithosphère océanique âgée, froide et dense. Localement, dans les zones de subduction, le magmatisme lié à la remontée de matériel chaud est à l'origine d'un flux thermique élevé au niveau des arcs volcaniques ou des cordillères. Ainsi, la Terre est une **machine thermique**, dont la dissipation de l'énergie interne constitue **le moteur de la dynamique des plaques lithosphériques**.

La géothermie : une source d'énergie au service du développement durable

L'énergie géothermique utilisée actuellement par l'homme couvre environ 1 % des besoins énergétiques mondiaux pour **la production d'électricité** et **la production de chaleur**. Le principe de la production de chaleur par géothermie consiste en la récupération de l'énergie thermique d'eaux profondes, naturellement présentes ou apportées par des conduites en profondeur. À travers le monde, environ 350 centrales géothermiques produisent de l'électricité. Ces centrales géothermiques sont en majorité implantées dans des zones de subduction (Japon, Nouvelle-Zélande, Antilles, etc.). D'autres centrales sont situées au niveau de dorsales océaniques (Islande, Açores), de fossés d'effondrement (Alsace, Kenya) ou de points chauds (Islande, Hawaï), mais également dans des régions stables du globe, comme les bassins sédimentaires (États-Unis, Chine, etc.).



1. manteau inférieur
2. noyau externe
3. noyau interne
4. asthénosphère
5. lithosphère

La convection dans le manteau (modèle à deux étages de cellules de convection)

Le prélèvement de l'énergie géothermique par l'homme ne représente qu'une **infime partie de l'énergie thermique dissipée** à la surface de la Terre. La géothermie constitue une source d'énergie inépuisable à l'échelle humaine, propre, écologique et économique. La géothermie est une source d'énergie au service du **développement durable**. La diversité des implantations géothermiques actuelles dans le monde montre l'importance de cette source d'énergie, que l'homme pourrait utiliser davantage qu'il ne le fait actuellement.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Le Kenya, as de la géothermie** p. 59
(Marion Douet, *Le Monde* daté du 13.12.2018)

ZOOM SUR...

LE GRADIENT GÉOTHERMIQUE EN FRANCE

Le gradient géothermique peut être comparé en différents points du territoire français : à 1,5 km de profondeur, la température est de 70 °C dans le Bassin parisien, alors qu'elle est de 100 °C en Alsace. Dans les Antilles, au niveau de l'île de la Guadeloupe, la température est de 250 °C à 1 km de profondeur. Cette valeur élevée s'explique par la subduction affectant cette région.

LES EXPLOITATIONS GÉOTHERMIQUES EN FRANCE

La seule centrale géothermique de France métropolitaine, mise en service depuis 2008, est installée à Soultz-sous-Forêts, en Alsace, au niveau du fossé rhénan. En effet, le fossé rhénan présente le plus fort gradient géothermique de la métropole et est donc propice à l'installation d'une centrale géothermique. Cette centrale géothermique utilise la technique de la géothermie des roches fracturées : de l'eau froide est injectée à plus de 5 000 m de profondeur dans des roches fracturées. Cette eau se réchauffe au contact des roches. L'eau chaude est alors extraite à une température de 200 °C et est utilisée pour alimenter des turbines produisant de l'électricité. La Guadeloupe, située dans une zone de subduction, présente un fort flux géothermique. À la centrale géothermique de Bouillante, de la vapeur d'eau à 250 °C jaillit directement du forage et est utilisée pour alimenter des turbines et produire de l'électricité.

L'exploitation géothermique basse energie, servant notamment à chauffer des bâtiments, est localisée dans les bassins sédimentaires (Île-de-France, Aquitaine).

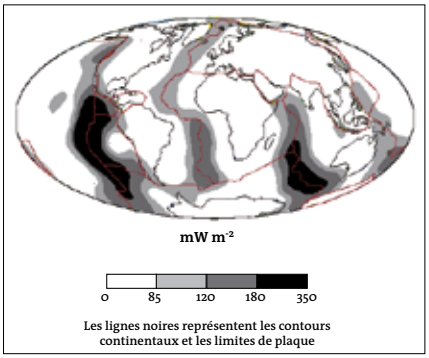
Actuellement la géothermie représente environ 0,44 % de la couverture énergétique française, mais sa part dans l'approvisionnement énergétique français devrait augmenter dans les années à venir, comme les autres énergies renouvelables que sont l'éolien terrestre et en mer, et le photovoltaïque.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 1 : L'énergie géothermique

L'intitulé complet du sujet

Cochez la proposition exacte pour chaque question de 1 à 6.



Carte mondiale des flux thermiques exprimés en milliwatts par mètre carré (mW.m^{-2})

1. Les zones noires et en grisé visibles sur la carte représentent :
a) un flux thermique élevé.
b) un flux thermique faible.
c) des différences de température océanique.
d) des courants océaniques chauds.

2. Les zones de flux fort visibles sur la carte :
a) sont liées à une plus forte énergie solaire arrivant à la surface de la Terre.
b) sont liées à un volcanisme de point chaud.
c) sont en relation avec des dorsales.
d) sont liées à la présence desocéans à la surface du globe.

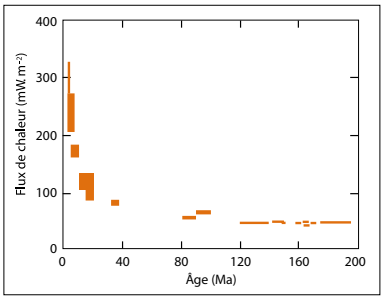
3. Les zones de flux fort sont associées :
a) aux zones de subduction.
b) à la création d'asthénosphère.
c) à la création de lithosphère océanique.
d) à la création de lithosphère continentale.

4. L'énergie géothermique exploitable par l'homme :
a) est constante d'une région à l'autre.
b) est maximale au niveau de la lithosphère continentale.
c) est optimale en Islande au niveau d'un rift.
d) contribue fortement à la couverture énergétique de l'humanité.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Cocher deux réponses ou ne cocher aucune réponse.
• Négliger les documents quand leur utilisation est nécessaire pour répondre à la question.

Le document ci-dessous représente le flux thermique au niveau du plancher océanique en fonction de son âge en millions d'années. Chaque boîte représente la variabilité des données dans la tranche d'âge considérée.



5. Le graphique montre que :
a) le flux thermique du plancher océanique augmente lors de son vieillissement.
b) le plancher océanique s'enfonce au fur et à mesure de son vieillissement.
c) le plancher océanique se refroidit en vieillissant.
d) le flux thermique est constant au niveau du plancher océanique.

6. On peut associer les zones du plancher océanique à flux thermique faible avec :
a) une lithosphère sous-jacente plus fine et plus dense.
b) une lithosphère sous-jacente plus épaisse et plus légère.
c) une lithosphère sous-jacente plus fine et plus légère.
d) une lithosphère sous-jacente plus épaisse et plus dense

Le corrigé

1. a), 2. c), 3. c), 4. c), 5. c), 6. d)

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances avec question de synthèse :
– En vous appuyant sur quelques exemples, montrez que le flux et le gradient géothermiques varient en fonction du contexte géodynamique.

Étude de documents :
– Étude d'une région : relations entre flux et gradient géothermiques, données de la tomographie sismique, contexte géodynamique et possibilité d'exploitation géothermique.

ZOOM SUR...

LA TOMOGRAPHIE SISMIQUE

Il s'agit d'une technique permettant de cartographier l'intérieur de la Terre en étudiant la vitesse des ondes sismiques. La tomographie vise à corréler les anomalies de vitesse des ondes sismiques avec des variations de composition chimique, d'état physique ou de température des différents milieux composant les enveloppes de la Terre. Une anomalie dite « négative » correspond, dans une région donnée, à une diminution de la vitesse des ondes sismiques. À l'inverse, une anomalie « positive » correspond à une augmentation de la vitesse de ces ondes. Dans une zone du globe terrestre où la minéralogie des roches est identique, une anomalie négative indique une zone moins dense, donc plus chaude. Une anomalie positive est interprétée comme l'existence d'une zone plus dense, donc plus froide. Ainsi la tomographie sismique permet d'accéder à la connaissance des caractéristiques des enveloppes internes de la Terre.

LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

La géothermie domestique dite « très basse énergie » utilise des sources d'énergie thermique dont la température est de moins de 30 °C. Des pompes à chaleur permettent de puiser l'énergie thermique contenue dans les couches superficielles du sous-sol. Il est ainsi possible de chauffer et de produire de l'eau chaude pour des maisons individuelles ou des immeubles de petite taille. Cette géothermie domestique à très basse énergie n'utilise pas l'énergie géothermique d'origine interne mais la chaleur solaire emmagasinée par le sol et le sous-sol. La géothermie très basse énergie devrait se développer dans les années à venir avec l'amélioration des rendements des pompes à chaleur mises sur le marché.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Kenya, as de la géothermie

Près de 85 % de l'électricité du pays provient des énergies renouvelables.

A première vue, rien de très impressionnant. Des fumerolles blanches s'échappent du sol, tandis que des tuyaux, de taille variable, serpentent au milieu de vertes collines. A Olkaria, l'essentiel se passe en sous-sol. Sous nos pieds, la très active faille du Rift fait remonter près de la croûte terrestre une vapeur d'eau sous pression à 300 °C environ. Captée par 120 puits, envoyée vers quatre centrales électriques, elle y est transformée en électricité. Ce site géothermique, situé à moins de deux heures de route de la capitale, Nairobi, a fourni la moitié de l'énergie consommée au Kenya en 2018. *« Les conditions à Olkaria sont très favorables, bien plus que dans d'autres régions du monde,* se félicite Cyrus Karingithi, ingénieur chez KenGen, le fournisseur national d'électricité. *Ici, nous devons creuser à environ 3 km en profondeur, c'est une bonne distance. En Islande, il ne faut qu'un kilomètre, mais en France il faudrait aller à 10 ou 15 kilomètres ! »*, poursuit-il, planté devant un puits, un tuyau plongeant dans le sol et d'où s'échappe une odeur de soufre.

Pour le Kenya, un pays de 48 millions d'habitants qui affiche une croissance soutenue, cette énergie venue des entrailles de la terre est une aubaine. Abondante et stable, elle alimente en continu le réseau électrique. *« La géothermie n'émet pas de gaz à effet de serre et l'impact sur l'environnement est très faible »*, l'eau pompée étant réinjectée dans le sol sans ajout de produits chimiques, poursuit Cyrus Karingithi. En surface, admet-il, le développement d'Olkaria ne s'est pas fait sans contraintes. Tout d'abord, 150 familles ont dû être *« relocalisées »* hors du site. De plus, une partie des installations, se trouvant au milieu du parc naturel du Hell's Gate, ont dû être adaptées – les tuyaux ont été surélevés d'environ un mètre pour autoriser le passage des animaux.

Le chemin a été long avant que la géothermie ne s'impose au Kenya. Entre 1956, date des premières recherches, et le tournant des années 2010, son développement a été poussif. *« Nous ne parvenions pas à mobiliser assez de financements, car les risques étaient élevés pour les investisseurs »*, explique Peter Odhengo, chargé de ces sujets au ministère des finances. Principale menace : la phase d'exploration, qui représente, comme dans l'industrie pétrolière, un coût significatif pour un taux d'échec important. *« Au début des années 2010, le gouvernement a décidé de prendre lui-même en charge ce risque. Cela a catalysé les investissements. Résultat, ces dix dernières années, nous avons ajouté plus de capacités géothermiques que sur les quatre décennies précédentes. »*

« Secteur électrique sain »

Dernières unités en date, la centrale n° 4 et l'extension de la n° 1 (140 MW chacune) ont ainsi été financées par le gouvernement et par des prêts contractés auprès d'institutions de développement (dont la Banque européenne d'investissement, BEI, et l'Agence française de développement, AFD) pour un montant total de 1,3 milliard de dollars. *« Un facteur-clé a aussi été que le Kenya possède un secteur électrique sain et une société publique sérieuse et solide »*, complète Laurent Farge, chargé de l'énergie au bureau kényan de l'AFD. Avec plus de 650 MW, le Kenya s'enorgueillit d'être le précurseur africain de la géothermie quand ses voisins, l'Ethiopie et la Tanzanie, qui disposent aussi d'un potentiel important, n'utilisent pas encore, ou très peu, cette technologie. A l'échelle mondiale, il se place même au 8e rang en matière de capacités géothermiques, juste derrière des pays « pionniers » comme l'Islande ou le Japon. Et les possibilités sont encore immenses : la faille du Rift, qui court du nord au sud du pays, pourrait lui fournir 10 000 MW au total, soit l'équivalent de dix réacteurs nucléaires.

Le 12 novembre, en marge du Forum de Paris sur la paix, le président Uhuru Kenyatta affirmait poursuivre un objectif de *« 100 % d'énergies vertes d'ici à 2020 »*. Avec l'hydraulique, la part des renouvelables dans la production d'électricité monte à près de 85 %. Face au coût de production très compétitif de ces deux énergies renouvelables (0,07 dollar/kilowattheure pour la géothermie), les centrales au fioul et au diesel tournent de moins en moins. *« Le taux d'utilisation des centrales thermiques est passé de 65 % en 2013-2014 à environ 15 % dès 2014-2015, principalement aux heures de pointe »*, note Laurent Farge. Conséquence : des économies substantielles sur les importations de pétrole, mais aussi une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En 2019, cette tendance à la « verdisation » du mix énergétique va se poursuivre avec la mise en service de plusieurs sites : la ferme éolienne « géante » du lac Turkana (300 MW), déjà partiellement opérationnelle ; la centrale solaire de Garissa (50 MW), la première du pays ; ainsi qu'une 5e unité géothermique (160 MW), en construction.

Un tableau idyllique… ou presque. Près de la Somalie, le Kenya prévoit de construire sa toute première centrale à charbon dans le comté de Lamu, une destination touristique préservée. Un mégaprojet de 981 MW que le gouvernement justifie notamment par la nécessité de diversifier le mix énergétique, mais que plusieurs des sources interrogées estiment surtout lié aux intérêts économiques d'acteurs influents. Portée par le conglomérat local Centum, la centrale utiliserait une technologie de charbon à très haut rendement du géant américain General Electric. *« On nous dit que c'est du charbon propre, mais ce sont des mensonges,* estime l'activiste Okiya Omtatah, qui, avec l'ONG locale Save Lamu, conteste ce projet devant la justice. *Le charbon est critiqué dans le monde entier. Je leur demande de prouver scientifiquement ce qu'ils avancent. »*

Dans un rapport publié en juillet, la Commission de régulation de l'énergie (ERC) a recommandé de reporter la centrale, prévue pour 2024. Le régulateur soulignait que sa mise en service déboucherait sur un excès de production et sur un doublement du coût de production de l'électricité. En octobre, après la bronca des porteurs du projet, le rapport a été retiré par l'ERC, qui a promis de « revoir » sa copie.

Marion Douet (Olkaria, Kenya, envoyée spéciale),
Le Monde daté du 13.12.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Le Kenya, situé dans la vallée du Rift en Afrique, présente un fort potentiel géothermique. Cet article présente l'essor récent de l'exploitation géothermique au Kenya pour produire de l'électricité. À proximité de la capitale Nairobi, la centrale géothermique d'Olkaria puise à 3 kilomètres de profondeur de l'eau chauffée naturellement à 300 °C pour produire de l'énergie électrique couvrant la moitié des besoins en électricité du pays. Cette électricité issue de la géothermie est peu onéreuse, produite en continu et présente un faible impact environnemental, caractérisé notamment par une émission quasi nulle de gaz à effet de serre. La production géothermique d'électricité gagnerait à être davantage développée dans les pays dont le potentiel géothermique est important, contribuant ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La plante domestiquée

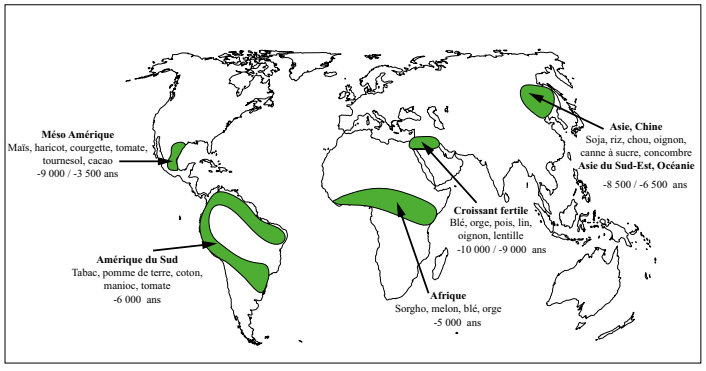
La culture des plantes pour l'alimentation humaine mais aussi l'habillement, l'énergie, la médecine, etc., constitue un enjeu majeur pour l'humanité. Au Néolithique (12 000 à 4 000 environ avant J-C), la sédentarisation de l'homme s'est accompagnée d'une domestication des espèces végétales, qui s'est poursuivie depuis. Comment des plantes sauvages ont-elles été domestiquées par l'homme dans le passé ? Quelles méthodes l'homme utilise-t-il actuellement pour modifier les plantes qu'il cultive ?

La domestication à l'origine des plantes cultivées

Les espèces végétales actuellement cultivées sont issues d'un processus de domestication d'espèces initialement sauvages qui s'est déroulé sur **plusieurs milliers d'années**, comme l'attestent les études archéologiques.
La domestication consiste en une **sélection artificielle**, au cours de laquelle l'homme choisit des **caractères intéressants** pour la culture et l'utilisation de la plante. Ces caractères sont généralement contrôlés génétiquement et sont donc transmis à la descendance de la plante. Par exemple, les premiers agriculteurs ont sélectionné les grains de blé les plus lourds pour servir de semences à leurs cultures suivantes. Après plusieurs générations et sélections successives des grains les plus lourds, les grains produits ont une masse plus élevée que ceux initiaux.
Les caractères des plantes favorables à leur utilisation par l'homme sont en général défavorables à la croissance de la plante en milieu sauvage.
Le croissant fertile (Moyen-Orient), l'Amérique centrale et l'Asie du Sud-Est sont les berceaux de la majorité des espèces végétales cultivées aujourd'hui dans le monde entier.

La sélection artificielle se poursuit après la domestication

Après domestication, la sélection artificielle se poursuit par différentes modalités : sélection des caractères intéressants, mais aussi hybridations (spontanées ou provoquées) entre deux espèces différentes, doublement spontané du nombre de chromosomes après hybridation, mutations spontanées, etc.



L'origine d'espèces végétales cultivées actuellement

Dans le passé, une espèce était souvent soumise à une **sélection variétale**, consistant à générer différentes variétés de cette même espèce. Chaque variété présentait alors des caractères propres, sélectionnés en fonction des conditions de cultures locales. L'existence de ces différentes variétés d'une même espèce végétale cultivée constitue une forme de **biodiversité**.
Actuellement, la création de nouvelles variétés se poursuit. Ainsi, dans une espèce donnée, on peut conférer un caractère intéressant d'une variété dite « donneuse » à une autre variété dite « receveuse », qui, elle-même présente d'autres caractères intéressants. Pour cela, les deux variétés sont croisées, et les descendants du croisement présentant le caractère d'intérêt sont sélectionnés et croisés à nouveau avec la variété receveuse. Après répétition des étapes de croisement et de

ZOOM SUR...

DOMESTICATION
Processus de sélection par l'homme d'espèces végétales sauvages à l'origine des premières espèces cultivées.

GÉNIE GÉNÉTIQUE
Ensemble de techniques de modification du génome d'un être vivant sans intervention des moyens naturels de reproduction.

OGM
Organisme génétiquement modifié, dont le génome a été modifié par transgénèse, c'est-à-dire par l'insertion de matériel génétique exogène.

SÉLECTION ARTIFICIELLE
Choix effectué par l'homme des espèces à cultiver en fonction des caractères jugés intéressants pour lui et qui seront transmis à la descendance de ces espèces.

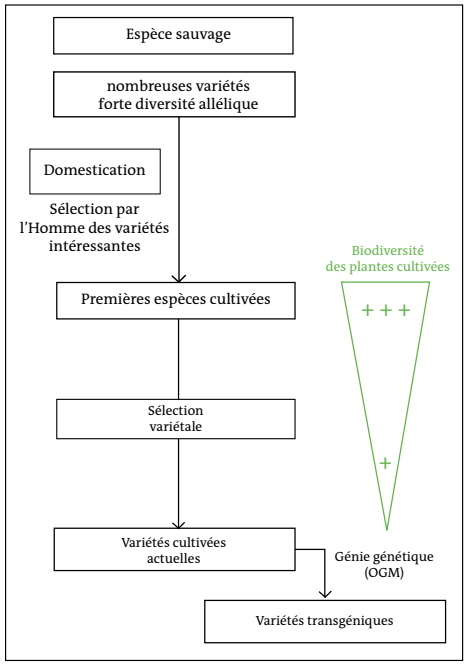
LA RÉVOLUTION DU NÉOLITHIQUE
À partir d'environ 9 000 avant J-C, d'abord en Orient puis en Occident, notamment dans le bassin méditerranéen, les populations connaissent un changement radical de leur mode de vie. Auparavant chasseurs-cueilleurs, ils deviennent des producteurs, pratiquant cultures et élevages. Des céréales et légumineuses sont sélectionnées et cultivées, et des animaux domestiques sont élevés : porc, bœuf, mouton, chèvre, sans oublier le chat, le chien et le cheval. La chasse et la cueillette restent toutefois pratiquées. Cette transformation du mode de vie, qualifiée de « révolution », a de nombreuses conséquences : amélioration et diversification de l'alimentation, modification de l'habitat, de la vie culturelle et spirituelle, etc. Elle s'accompagne également du développement de la céramique. Le Néolithique prend fin avec le développement de la métallurgie et l'invention de l'écriture vers 3 300 avant J-C.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

sélection, la variété receveuse présente le caractère d'intérêt, tout en ayant conservé ses autres caractères intéressants. Cette **amélioration variétale** est un long processus.
Les croisements peuvent aboutir à l'émergence d'une nouvelle espèce. Ainsi la clémentine est-elle un hybride entre la mandarine et l'orange douce.

La biodiversité des plantes cultivées

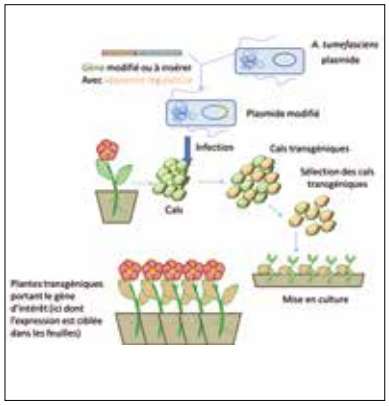
La biodiversité des plantes cultivées a, pendant longtemps, été assez importante. Mais depuis quelques dizaines d'années, la sélection des variétés les plus productives aboutit à la **culture d'un nombre réduit de variétés**. Or, cette réduction de la biodiversité peut avoir de graves conséquences. Par exemple, au début du XIX^{e} siècle, un champignon, le mildiou, s'attaqua aux plants de pommes de terre en Irlande et provoqua une immense famine. À la même époque, l'Europe fut touchée par une épidémie d'un insecte piqueur, le phylloxera, qui décima presque tous les ceps de vigne. Le vignoble français fut reconstruit à partir de greffes de cépages français sur des pieds de vignes américains naturellement résistants au phylloxera. Il est toujours judicieux, comme le démontrent ces exemples, de **conserver des variétés végétales moins productives** mais susceptibles d'être porteuses de caractères pouvant se révéler intéressants, comme la résistance à des maladies.



Évolution de la biodiversité des espèces cultivées

Génie génétique et plantes cultivées

Le **génie génétique** permet de modifier le **génome** d'un être vivant. Les outils du génie génétique introduisent un gène d'intérêt dans le génome des cellules d'une plante : il s'agit d'un **transfert de gène** ou **transgénèse**. La présence du gène transféré ou transgène confère à la plante de nouveaux caractères. La plante ainsi modifiée est un **OGM** (organisme génétiquement modifié). Des OGM, comme le maïs transgénique résistant à des herbicides, sont cultivés dans plusieurs pays. Les avantages et les inconvénients des OGM sont encore largement débattus et sont sujets à controverse.



Principe du transfert biologique de gènes pour créer des organismes génétiquement modifiés (OGM)
Un cal est un amas de cellules végétales non différenciées pouvant générer *in vitro* une plante.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Le regain des semences paysannes** p. 63-64
(Angela Bolis, *Le Monde* daté du 21.08.2018)

ZOOM SUR...

UN OGM : LE MAÏS BT

Les végétaux peuvent être attaqués par une bactérie appelée *Agrobacterium tumefasciens*. Cette bactérie porte des petites molécules circulaires d'ADN, appelées plasmides Ti, qui sont distinctes du chromosome bactérien. À la faveur d'une blessure du végétal, la bactérie l'infecte et injecte ses plasmides Ti dans les cellules végétales. Les plasmides Ti sont alors capables de s'intégrer dans le génome des cellules de la plante. C'est ce système naturel de transfert de gène qui a été utilisé pour fabriquer les premiers OGM. Pour la construction de l'OGM, le plasmide Ti est modifié. Le gène responsable de la virulence de la bactérie est remplacé par le gène codant la toxine d'une autre bactérie appelée *Bacillus thurigiensis*. Cette protéine est toxique pour un insecte ravageur, la pyrale. Le plasmide Ti portant le gène d'intérêt (ici celui de la toxine de la bactérie *Bacillus thurigiensis*) est introduit dans des cals. Les cals sont des amas de cellules végétales indifférenciées obtenus *in vitro*. Seuls les cals ayant intégré le plasmide Ti dans leur génome sont sélectionnés et sont alors capables de générer des plantes entières de maïs dont toutes les cellules sont transgéniques. Ainsi, le maïs transgénique obtenu, appelé « Bt » (car produisant la toxine de *Bacillus thurigiensis*), a acquis un nouveau caractère : capable de synthétiser une molécule toxique pour la pyrale, il lui est devenu résistant.

UN OGM : LE SOJA TOLÉRANT À UN HERBICIDE

Plante transgénique la plus cultivée, cet OGM porte un gène d'origine bactérienne codant une protéine, l'enzyme EPSPS, qui permet la croissance de la plante en présence de l'herbicide. La plante possède une autre enzyme EPSPS végétale qui est bloquée par l'herbicide. Seules les plantes transgéniques ayant l'enzyme EPSPS microbienne poussent en présence de l'herbicide, mais pas les autres végétaux, comme les mauvaises herbes, ainsi éliminés par l'herbicide.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.1 : Un OGM riche en précurseurs de vitamine

Les documents

La carence[1] en vitamine A affecte, d'après l'Organisation mondiale de la santé (OMS), entre 100 et 200 millions d'enfants. Cette carence est responsable de graves troubles oculaires, de cécité infantile et du décès de plus d'un million d'enfants chaque année. Or, les tentatives de diversification nutritionnelle ou de suppléments en vitamines atteignent difficilement toutes les personnes concernées. Des chercheurs ont donc travaillé sur l'enrichissement en vitamine A (ou en précurseurs de vitamine A) de certains aliments de base dans certains régimes alimentaires. Ils ont ainsi mis au point un riz transgénique appelé « riz doré ».

Document 1 : Particularités du riz doré

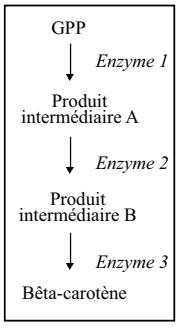
« Le bêta-carotène qui, une fois assimilé dans le corps humain, se transforme en vitamine A existe naturellement dans l'enveloppe du riz mais pas dans sa partie comestible, c'est-à-dire l'albumen. L'enveloppe du riz étant éliminée de manière à améliorer sa conservation, les grains consommés ne contiennent plus de bêta-carotène. Par l'introduction de trois gènes dans du riz, des chercheurs allemands ont réussi à restaurer dans l'albumen une voie de biosynthèse du bêta-carotène à partir de son précurseur : le GPP. Le bêta-carotène alors synthétisé colore les grains en jaune, d'où le surnom de "riz doré". Cependant, les teneurs obtenues jusqu'à présent ne fourniraient pas aux populations démunies en vitamine A les quantités de bêta-carotène qui leur seraient nécessaires. Mais les effets de carences plus ou moins prononcés pourraient être sensiblement allégés. Le génome du riz doré contient trois gènes codant pour la synthèse d'enzymes impliquées dans la chaîne de biosynthèse du bêta-carotène à partir du GPP à savoir : deux gènes de jonquille, qui permettent la fabrication des enzymes 1 et 2 ; un gène de bactérie, qui permet la fabrication de l'enzyme 3. »

Source : www.maison-des-sciences.ac-versaillers.ll.docs/OGM.pdf

1. *apport insuffisant voire manque*

Document 2 : Incertitudes scientifiques autour du riz doré

Le GPP, naturellement présent dans le riz, permet à la cellule de fabriquer un certain nombre de molécules, dont la vitamine E, des chlorophylles et de l'acide gibbérellique (substance favorisant la croissance végétale). La fraction du GPP, qui dans le riz doré sera utilisée pour fabriquer du bêta-carotène, ne sera plus disponible pour la synthèse des autres molécules dont il est également le précurseur. Autrement dit, il est probable que le riz doré, qui fabrique du bêta-carotène, fabrique moins de vitamine E, et que les rendements obtenus avec ce riz transgénique soient nettement diminués en raison d'une synthèse amoindrie de chlorophylles et d'acide gibbérellique.



La chaîne de biosynthèse du bêta-carotène

Les questions

1. Le bêta-carotène, contenu notamment dans le riz doré :
a) permet de pallier les carences en GPP.
b) empêche la synthèse de la vitamine E de l'individu qui ingère du riz doré.
c) permet de pallier à 100 % les carences en vitamines A.
d) se transforme en vitamine A chez la personne qui ingère du riz doré.

2. Le riz doré est issu d'une transgénèse de trois gènes codant pour la synthèse :
a) de la vitamine A du riz dans le génome d'une bactérie.
b) des enzymes permettant la production du bêta-carotène.
c) de la vitamine A d'une jonquille dans le génome du riz.
d) des enzymes activant la voie de la biosynthèse de la vitamine A.

3. La fabrication du riz doré transgénique a été faite pour :
a) pallier les problèmes liés à l'utilisation de pesticides.
b) améliorer le rendement des rizicultures pour nourrir certaines populations humaines.
c) diminuer les effets d'une carence alimentaire touchant certaines populations humaines.
e) éviter l'apport massif d'engrais dans les cultures.

4. D'après certains scientifiques, la modification génétique du riz aboutissant à des plants de riz doré pourrait entraîner une production :
a) moindre du fait d'un rendement végétal diminué.
b) accrue de vitamine E par la plante.
c) de plantes plus riches en pigments chlorophylliens.
d) de plantes plus résistantes aux parasites.

Le corrigé

1. d), 2. b), 3. c), 4. a).

Ce qu'il ne faut pas faire

- Cocher deux réponses, ou ne cocher aucune réponse.
- Négliger les informations apportées par les documents.

ZOOM SUR…

L'ORIGINE DES BLÉS CULTIVÉS

Actuellement, nous consommons du blé tendre, utilisé pour les farines de pain, de pâte à pizza, et du blé dur pour la semoule et les pâtes. Quelle est l'origine de ces deux blés ?

Il y a - 17 000 ans, a eu lieu une hybridation spontanée entre deux espèces sauvages de céréales : l'engrain sauvage (dont le génome comporte $2n$ = 14 chromosomes) et un égilope inconnu mais proche de l'égilope faux épeautre actuel (comportant également $2n$ =14 chromosomes). Cette hybridation s'est accompagnée d'un doublement du nombre de chromosomes et a donné naissance à une nouvelle espèce : l'amidonnier sauvage, dont les cellules comportent $2n$ = 28 chromosomes.

Au tout début du Néolithique, vers – 12 000 ans, l'homme a domestiqué cet amidonnier sauvage. Puis, il a continué de sélectionner des phénotypes de l'amidonnier intéressants pour sa culture. Les caractères de l'amidonnier cultivé ont ainsi été peu à peu modifiés pour donner, il y a environ – 2 000 ans, le blé dur, dont le génome comporte $2n$ = 28 chromosomes. D'autre part, vers – 9 000 ans, une hybridation a eu lieu entre l'amidonnier cultivé et l'égilope rugueux (espèce à $2n$ = 14 chromosomes), suivie d'un doublement du nombre de chromosomes, qui a abouti à la formation d'une nouvelle espèce : le blé tendre, dont le génome comporte $2n$ = 42 chromosomes.

L'ORIGINE DU MAÏS

Le maïs, originaire du Mexique, est issu d'une domestication, datée vers – 7 000 ans, d'une espèce ancestrale, proche d'une espèce sauvage actuelle : la téosinte. Suite à cette domestication, les populations amérindiennes ont procédé à une sélection variétale générant plusieurs variétés adaptées localement. Introduite en Europe au XIX^{e} siècle, le maïs est une des céréales les plus produites au monde, avec le blé et le riz.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le regain des semences paysannes

Petits sélectionneurs et banques de gènes font revivre des variétés locales.

Sur les terres des frères Zollinger, bordées par le lac Léman et les Alpes suisses, dans la commune des Evouettes, les asperges sont montées en graine et les carottes ouvrent leurs ombelles blanches. Nulle négligence dans ce laisser-pousser : les légumes ne sont pas cultivés pour leur chair, mais pour leurs graines. Pionniers des semences bio en Suisse, les Zollinger se sont lancés dans les années 1980 avec une douzaine de variétés, collectées dans les jardins villageois, les champs ou les monastères.

Depuis, les quatre fils ont repris l'entreprise familiale, et le catalogue s'est étoffé, avec quelque 450 variétés potagères et horticoles. Des variétés anciennes, ou modernes, mais toujours locales et libres de droit. Une démarche à contre-courant de l'industrie semencière, qui protège ses productions par des droits de propriété visant à interdire ou à taxer les « semences de ferme », c'est-à-dire celles avec lesquelles un agriculteur resème une partie de sa récolte. Pourtant, la petite maison Zollinger prospère.

« Les gros sélectionneurs investissent des millions, pendant des années, pour faire entrer sur le marché une nouvelle variété ultra-performante. Ils veulent donc la protéger du piratage, explique l'aîné, Tulipan Zollinger. *De notre côté, on s'adresse aux jardiniers et aux petits maraîchers, qui cherchent des variétés différentes, " "swiss-made", adaptées aux petites productions… On a, par exemple, la tomate rose de Berne, difficile à produire mais très savoureuse »*, précise-t-il.

L'essor du bio

Encore très minoritaires, les variétés locales tentent de prendre racine, aux marges d'un marché des semences restrictif et de plus en plus concentré – Bayer-Monsanto, Dupont-Dow et Syngenta-ChemChina détiennent à eux trois plus de la moitié du marché mondial. Malgré tout, on assiste à leur indéniable retour en grâce. En France, le Réseau Semences paysannes, né en 2003, fédère aujourd'hui une centaine d'organisations. Comme d'autres mouvements européens, il revendique le droit de reprendre en main ces variétés « à la ferme » et de les faire circuler librement.

Car, avec l'essor du bio, de la vente directe, des produits du terroir ou des potagers, l'agriculture se diversifie… et ses besoins en semences aussi. Dans ces productions de niche, la variété d'élite, prolifique partout (pour peu que les milieux soient homogénéisés à l'aide d'intrants ou d'irrigation), n'est pas la plus adéquate. On recherche au contraire une culture singulière, la mieux adaptée à sa région et à son usage : tel blé résiste à la sécheresse, ou à l'altitude, tel autre est d'excellente qualité pour faire du pain…

C'est la conception même de diversité culturale qui est en jeu dans cette bataille. *« Pour nous, ce sont des populations hétérogènes* [chaque plante est différente]*, dont la force est de s'adapter aux savoir-faire paysans et au milieu »*, détaille Patrick de Kochko, coordinateur du Réseau Semences paysannes. Tout l'inverse des variétés commerciales obtenues par les sélectionneurs et semenciers. Pour être inscrites au catalogue officiel, celles-ci doivent être stables dans le temps, homogènes, ou encore démontrer un progrès génétique par rapport aux variétés existantes.

Ces critères, censés garantir la qualité et la conformité des semences qui occupent l'essentiel des marchés, excluent toute la gamme des semences paysannes. Or, sans catalogue, pas de commerce, ou presque. Pour les récoltes paysannes, seuls sont autorisés des échanges en petits sachets ou, depuis la loi sur la biodiversité de 2016, une utilisation dans le cadre de l'« entraide agricole », à titre gratuit.

La donne pourrait changer avec le nouveau règlement européen sur l'agriculture bio, adopté en avril, qui autorise leur commerce à partir de 2021. *« Le règlement ne parle pas de semences paysannes mais de matériel hétérogène, avec une approche très technique et conventionnelle de la variété, finalement assez éloignée de nos pratiques »*, note toutefois Patrick de Kochko. Il craint que cette dérogation n'ouvre en fait une brèche aux « nouveaux OGM ».

Une avancée en demi-teinte, donc, après des décennies d'érosion de la biodiversité plantée. Selon l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO), la diversité des cultures s'est réduite de trois quarts au cours du XX^{e} siècle. Après la seconde guerre mondiale, l'agriculture se recentre autour de quelques variétés modernes à haut rendement, adaptées à la mécanisation et aux intrants chimiques.

Délaissées, les variétés paysannes se sont retrouvées reléguées dans des banques de graines. Ces conservatoires sont aujourd'hui plus de 1 750 dans le monde, chargés de veiller sur ce précieux patrimoine génétique.

Retourner aux champs

Retour en Suisse. Sur l'autre rive du lac Léman se dresse, discrète, la banque de semences nationale de Changins. Elle a été fondée en 1900

POURQUOI CET ARTICLE ?

Actuellement, la grande majorité des cultures utilisent des semences ultra-performantes, commercialisées dans le monde entier par de grandes firmes agrochimiques. **Cet article présente la démarche d'une petite entreprise suisse qui produit des semences dites paysannes, c'est-à-dire produites par des agriculteurs et donc locales et libres de droits,** en partenariat avec une banque de semences voisines. L'objectif est double : obtenir des semences intéressantes, adaptées localement, et lutter contre l'inquiétante érosion de la diversité génétique des plantes cultivées. Au niveau de l'Europe, des avancées juridiques sur le commerce des semences paysannes sont attendues pour faciliter ces démarches agricoles innovantes et pertinentes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

par des sélectionneurs et conserve aujourd'hui quelque 13 000 variétés agricoles. Autant d'échantillons de graines qui dorment, rangés et étiquetés, dans ses sous-sols réfrigérés. Régulièrement, les semences sont mises en terre pour être régénérées, sur de petites parcelles où se côtoient ancêtres du blé, épeautres anciens ou sojas modernes.

« Ce qui nous intéresse, ce n'est pas tant la valeur agronomique de ces variétés que le maintien de la diversité génétique », explique Arnold Schori, responsable de l'amélioration des plantes. Pour le chercheur, cette diversité *« constitue un réservoir de caractéristiques crucial pour assurer l'avenir alimentaire : adaptation au changement climatique, aux nouvelles maladies… »*. Parmi leurs types de 6 000 blés, les équipes de Changins ont ainsi retrouvé, dans une ancienne souche issue des montagnes des Grisons, une résistance à la pourriture de la neige… utilisée ensuite par des sélectionneurs japonais.

Gardiennes des ressources génétiques, les banques de graines ont néanmoins leurs limites. Soumises aux pressions des sélectionneurs, elles ont souvent privilégié les grandes cultures, au détriment d'espèces mineures comme l'orge ou le sarrasin. Et elles ne conservent qu'un petit échantillon, figé, de chacune des variétés qu'elles abritent.

« Ces banques jouent un rôle positif dès lors qu'elles distribuent des variétés aux agriculteurs qui les remettent en circulation, et qu'elles sont source d'une rediversification dans les champs. C'est de plus en plus le cas », observe Isabelle Goldringer, généticienne à l'Institut national de la recherche agronomique.

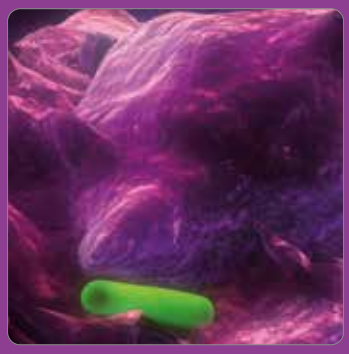
L'enjeu est désormais, pour les variétés locales, de retourner aux champs après être sorties des banques de gènes. Ces institutions sont souvent le dernier endroit où paysans, amateurs et petits semenciers peuvent retrouver des variétés oubliées. A l'instar des frères Zollinger, qui ne se sont pas privés d'y puiser pour enrichir leur propre catalogue. Chaque année, leurs clients élisent cinq variétés sauvegardées dans les coffres de Changins, qu'ils multiplient, réadaptent au milieu et au goût des consommateurs… avant de les remettre sur le marché. La plante reprend vie. Pour Tulipan Zollinger, *« c'est en la cultivant dans un maximum de jardins qu'elle sera le plus en sécurité »*.

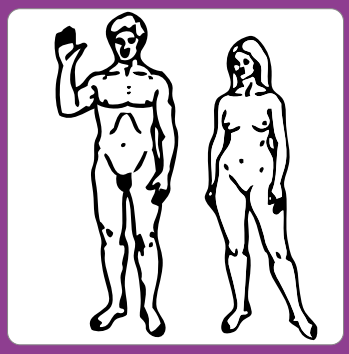
Angela Bolis (Les Evouettes, envoyée spéciale),
Le Monde daté du 21.08.2018

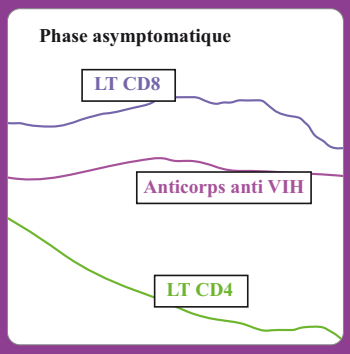
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE MAINTIEN DE L'INTÉGRITÉ DE L'ORGANISME :

QUELQUES ASPECTS DE LA RÉACTION IMMUNITAIRE



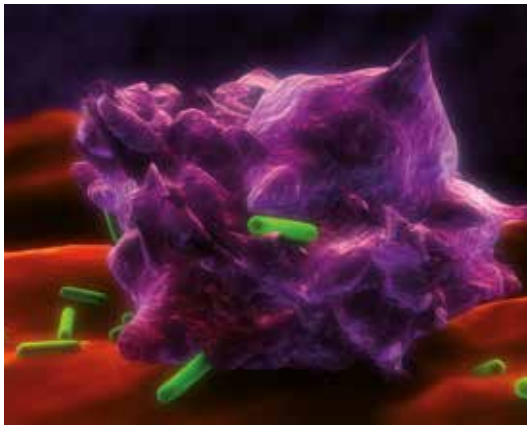




© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée

L'organisme humain est pourvu d'un système de protection contre les éléments pathogènes qui menacent son intégrité. Ces éléments pathogènes peuvent être des virus, des bactéries, des eucaryotes, des parties d'êtres vivants (pollens, poils, etc.), des éléments physico-chimiques (fibres d'amiante, poussières, etc.) ou encore les propres cellules modifiées de l'organisme, comme les cellules cancéreuses. Ces éléments pathogènes sont potentiellement dangereux pour l'organisme et le système immunitaire est chargé du maintien de l'intégrité de ce dernier. Comment le système immunitaire protège-t-il l'organisme des éléments pathogènes ?



Les défenses de l'organisme contre l'intrusion des pathogènes

Nous possédons des **défenses physiques**, comme l'imperméabilité de notre épiderme et de nos muqueuses. Ces défenses sont complétées par des **défenses chimiques** (larmes, sueur, mucus) et **microbiologiques** (flore bactérienne, présente naturellement sur et dans notre corps). Malgré tout, à la faveur d'une blessure, d'une morsure ou d'une piqûre, des **pathogènes** peuvent pénétrer dans notre organisme. Une seconde ligne de défense est alors opérationnelle pour les neutraliser. Cette défense, l'**immunité innée**, se caractérise par la mise en place de la **réaction inflammatoire aiguë**. Cette réaction inflammatoire aiguë est **stéréotypée** : elle se déroule de la même façon, quel que soit l'agresseur, et se met en place dès son entrée, que l'agresseur soit connu ou non de l'organisme.

La réaction inflammatoire aiguë

Dans les tissus, des cellules comme les mastocytes, les macrophages, les cellules dendritiques sont présentes, en attente d'une rencontre éventuelle avec un pathogène. Ces cellules font partie des leucocytes (ou globules blancs) : ce sont des cellules sentinelles. Les pathogènes sont détectés par les récepteurs PRR à la surface de ces leucocytes. La détection de ces agents infectieux entraîne la sécrétion des **médiateurs chimiques de l'inflammation** par ces leucocytes. Il existe différents médiateurs chimiques de l'inflammation, comme l'histamine, la sérotonine, les cytokines pro-inflammatoires (IL-1, IL-6, TNF-α, etc.) et les éicosanoïdes (molécules dont font partie les prostaglandines, le thromboxane, la prostacycline et les leucotriènes). Ces médiateurs chimiques de l'inflammation activent la vasodilatation des capillaires. Ce qui entraine une augmentation du flux sanguin irriguant le site

NOTIONS CLÉS

IMMUNITÉ INNÉE
Ensemble des défenses de l'organisme existant dès la naissance, ne nécessitant pas d'apprentissage et qui se mettent en place très rapidement dans des situations diverses.

INFLAMMATION
Ensemble des réactions se produisant au niveau d'une lésion de l'organisme, où des éléments pathogènes peuvent se trouver.

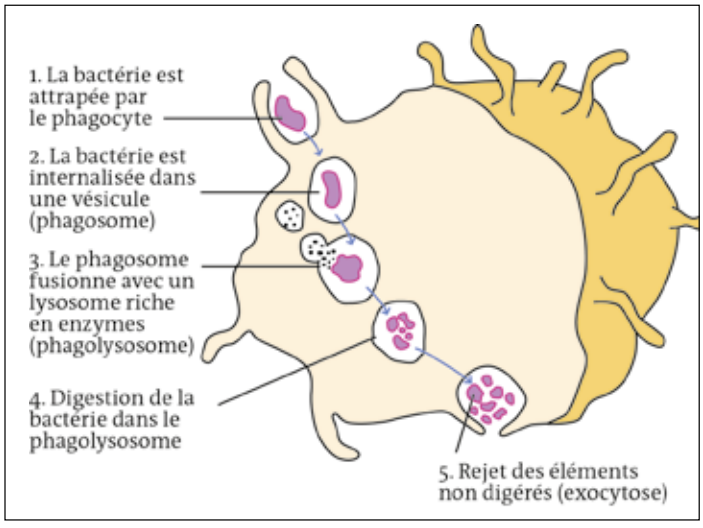
PHAGOCYTOSE
Mécanisme assurant l'ingestion par les cellules phagocytaires de particules ou de cellules à l'intérieur de vésicules, les phagosomes, en vue de leur élimination.

ZOOM SUR...

LES MALADIES INFLAMMATOIRES CHRONIQUES
Ces maladies se caractérisent par une inflammation quasi permanente des tissus touchés. On peut mentionner :
– la polyarthrite rhumatoïde. Les articulations sont le siège d'une réaction inflammatoire, elles deviennent douloureuses et déformées ;
– la maladie de Crohn. Elle consiste en une inflammation pouvant toucher la paroi de l'ensemble du tube digestif et se manifeste par des diarrhées et des douleurs abdominales.
Ces maladies se caractérisent par des poussées inflammatoires très douloureuses. La prise en charge médicale consiste en des traitements anti-inflammatoires visant à réduire les poussées inflammatoires douloureuses lors des crises. Des traitements de fond, notamment avec des immunosuppresseurs, sont prescrits pour réduire la réaction immunitaire à l'origine de l'inflammation. Ces maladies affectent des adultes plutôt jeunes et sont handicapantes dans la vie quotidienne. Le patient doit être suivi toute sa vie : il n'y a pas pour l'instant de traitement conduisant à une guérison complète.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

inflammatoire. Les cellules des parois des capillaires s'écartent, facilitant le passage des leucocytes du sang vers les tissus, mais aussi du plasma : cela induit **chaleur**, **rougeur** et **gonflement**. La stimulation des terminaisons nerveuses voisines provoque une sensation de **douleur**. Les leucocytes attirés sur le site inflammatoire éliminent différemment les pathogènes. Les granulocytes, les cellules dendritiques et les monocytes transformés en macrophages à leur arrivée dans les tissus réalisent la **phagocytose** du pathogène. La phagocytose est l'ingestion et l'élimination d'éléments considérés comme étrangers par les cellules phagocytaires. La phagocytose nécessite la reconnaissance du pathogène par des récepteurs membranaires des cellules phagocytaires (récepteurs PRR). La membrane du phagocyte se déforme et emprisonne le pathogène dans une vésicule, appelée « phagosome ». Cette vésicule fusionne avec des lysosomes, vésicules cytoplasmiques à contenu acide et riches en enzymes. Les enzymes contenues initialement dans les lysosomes digèrent le pathogène. Ainsi la réaction inflammatoire aiguë constitue la première ligne de défense active du système immunitaire qui vise à éliminer les pathogènes dès leur entrée dans l'organisme.



La phagocytose (d'après *Immunologie : le cours de Janis Kuby*)

La réaction inflammatoire aiguë peut produire des effets gênants (douleur, gonflement, fièvre) voire délétères pour certains organes si elle se prolonge trop longtemps. Il peut être nécessaire d'utiliser des médicaments qui limitent cette réaction inflammatoire sans limiter le déclenchement des réactions immunitaires détruisant les pathogènes. Il s'agit de médicaments anti-inflammatoires comme par exemple l'aspirine ou l'ibuprofène. Les anti-inflammatoire inhibent la synthèse des médiateurs chimiques de l'inflammation. Ces molécules ont également une action antalgique, qui diminue la sensation de douleur et certains anti-inflammatoires font également baisser la fièvre.

La réponse innée prépare la réponse adaptative

Après digestion du pathogène, une partie des molécules restantes sont exposées sous forme de **peptides** (ou **antigènes)** sur des récepteurs membranaires des phagocytes, les molécules du CMH. Si l'infection persiste, ces phagocytes, notamment les cellules dendritiques, quittent le site inflammatoire et migrent jusqu'aux **ganglions lymphatiques**. Les fragments protéiques provenant du pathogène détruit, associés aux récepteurs du phagocyte, sont alors présentés à des lymphocytes T, déclenchant ainsi la **réponse immunitaire adaptive**, spécifique de l'agent infectieux.

Les caractéristiques de l'immunité innée

Les mécanismes de l'immunité innée, qui existent chez tous les **animaux**, sont conservés au cours de l'évolution. L'immunité innée correspond aux réactions se mettant en place rapidement et se déroulant de manière stéréotypée, quelle que soit la situation initiale l'ayant déclenchée (infection, lésion des tissus, tumeur, etc.). La réaction inflammatoire aiguë est l'un des mécanismes essentiel de l'immunité innée. L'immunité innée est **fonctionnelle dès la naissance** et ses caractéristiques sont héritées génétiquement. Elle ne nécessite **aucun apprentissage** : les réactions de l'immunité innée sont similaires lors de la première rencontre avec un pathogène et lors des suivantes. Enfin, l'immunité innée coopère avec l'immunité adaptative, qui n'existe que chez les seuls vertébrés.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **L'inflammation, mal du siècle** p. 70-71
(Florence Rosier, *Le Monde* daté du 15.05.2019)

REPÈRES

LES DIFFÉRENTES CELLULES SANGUINES

• Les hématies, ou globules rouges, sont des cellules sans noyau, biconcaves et aplaties au centre. Elles assurent le transport de dioxygène dans le sang.
• Les leucocytes, ou globules blancs, interviennent dans la défense immunitaire de l'organisme :
– les granulocytes (également appelés « polynucléaires ») ont une activité antibactérienne (diapédèse, chimiotactisme et phagocytose) ;
– les cellules dendritiques sont présentes dans tous les tissus et en faible quantité dans le sang. Dans les tissus, elles détectent les agents pathogènes et déclenchent la réaction immunitaire adaptative ;
– les monocytes se différencient en macrophages dans les tissus et réalisent alors la phagocytose et la présentation de l'antigène aux autres cellules immunitaires ;
– les lymphocytes participent à la réponse immunitaire adaptative. Les lymphocytes T sont produits dans la moelle osseuse et subissent leur maturation dans le thymus, tandis que les lymphocytes B naissent puis mûrissent dans la moelle osseuse.
• Les plaquettes sont des fragments cellulaires qui interviennent dans la coagulation du sang.

LA DÉTECTION D'UNE RÉACTION INFLAMMATOIRE

Une analyse sanguine permet la détection de la survenue d'une réaction inflammatoire chez un patient. Pour cela, on mesure :
– la vitesse de sédimentation (VS) des hématies. L'inflammation entraîne la production d'une protéine, le fibrinogène, qui augmente l'agrégation des plaquettes et donc la sédimentation des hématies. La vitesse de sédimentation est donc augmentée ;
– la protéine-C-réactive (CRP). Cette protéine est produite rapidement lors de l'inflammation. La mesure de la concentration de la protéine-C-réactive permet d'estimer quand est survenue la réaction inflammatoire.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 1 : La réaction inflammatoire aiguë et l'intérêt des anti-inflammatoires

L'intitulé complet du sujet

Un camarade s'est blessé lors d'une chute. Quelques jours plus tard, il a mal, sa plaie est gonflée, rouge et purulente ; il consulte un médecin. Celui-ci, après avoir bien nettoyé la plaie, lui donne un médicament anti-inflammatoire. Votre camarade ne comprend pas la prescription du médecin : « Pourquoi dois-je prendre un médicament puisque je ne suis pas malade ! », vous dit-il.

Expliquez les mécanismes immunitaires mis en jeu dans ce cas précis et l'intérêt de prendre un anti-inflammatoire. Des schémas explicatifs sont attendus.

Proposition de corrigé

Introduction

Un camarade a fait une chute et s'est blessé. Quelques jours après qu'il est tombé, sa plaie est rouge, gonflée et du pus s'en écoule. Son médecin a nettoyé la plaie et lui a prescrit un anti-inflammatoire. Quels sont les mécanismes de la réaction inflammatoire et quel est l'intérêt de prescrire un anti-inflammatoire ? Dans une première partie, nous allons expliquer à notre camarade les mécanismes de la réaction immunitaire, puis, dans une seconde partie, nous lui expliquerons pourquoi le médecin lui a prescrit un anti-inflammatoire.

I. Les mécanismes de la réaction inflammatoire aiguë (ou RIA)

La chute s'accompagne de lésions cellulaires avec un risque élevé d'entrée de micro-organismes pathogènes dans l'organisme : une réaction immunitaire aiguë se met alors en place très rapidement.

a. Les symptômes stéréotypés de la RIA

La réaction inflammatoire aiguë se caractérise au niveau de la plaie par un gonflement, une rougeur, une douleur, une chaleur et une impotence fonctionnelle.

b. Le recrutement des défenses innées lors de la RIA

Des cellules immunitaires, comme par exemple les mastocytes, les cellules dendritiques ou les macrophages, sont constamment présentes aux lieux d'entrée potentielle de micro-organismes dans l'organisme. Par leurs récepteurs présents à leur surface, ces cellules immunitaires sont capables de reconnaître des molécules présentes sur la paroi de nombreuses espèces de bactéries. Cette reconnaissance entraîne la sécrétion par ces cellules immunitaires de molécules : les médiateurs chimiques de l'inflammation, comme l'histamine, la sérotonine, les cytokines pro-inflammatoires (IL-1, IL-6, TNF-α, etc.) et les éicosanoïdes. Ces médiateurs chimiques de l'inflammation déclenchent une réaction inflammatoire aiguë. Ainsi l'histamine, en augmentant la perméabilité de la paroi des vaisseaux sanguins, entraîne une vasodilatation et un afflux local de plasma, d'où la rougeur observée. De plus, les médiateurs chimiques de l'inflammation attirent sur le lieu de l'inflammation les cellules immunitaires sanguines, comme les granulocytes et les monocytes sanguins, qui se différencient dans le tissu lésé en macrophages.

c. L'action des cellules immunitaires lors de la RIA

Les cellules immunitaires, comme les granulocytes et les macrophages présents dans le tissu lésé, réalisent la phagocytose, c'est-à-dire qu'ils ingèrent puis éliminent les agents infectieux.

Dans le cas où cette première réponse immunitaire n'est pas suffisante pour éliminer les micro-organismes pathogènes, interviennent d'autres cellules immunitaires : les cellules dendritiques, présentes dans le tissu lésé. Ces cellules fixent sur leurs molécules membranaires du CMH (complexe majeur d'histocompatibilité) des antigènes de l'élément infectieux. Ces cellules migrent alors jusqu'aux ganglions lymphatiques, où elles présentent les antigènes liés aux molécules du CMH aux lymphocytes T. Les lymphocytes ainsi activés interviendront dans l'élimination des agents pathogènes, dans le cadre de l'immunité adaptative.

ZOOM SUR…

LES ANTI-INFLAMMATOIRES

Parmi les anti-inflammatoires, on distingue :

– les corticoïdes, dérivés de la cortisone. Les corticoïdes inhibent la plupart des phénomènes immunitaires, dont la production des médiateurs chimiques de l'inflammation comme l'histamine et les éicosanoïdes (molécules dérivées de l'oxydation d'acides gras de la membrane plasmique des cellules immunitaires, comme les prostaglandines, le thromboxane, la prostacycline et les leucotriènes) ;

– les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), comme l'aspirine et l'ibuprofène. Le mode d'action commun des AINS repose sur l'inhibition de la formation d'une partie des éicosanoïdes : les prostaglandines. Les AINS ont donc aussi une action antalgique (lutte contre la douleur) et antipyrétique (diminution de la température de l'organisme).

À noter : le paracétamol n'est pas prescrit comme anti-inflammatoire mais comme antalgique et antipyrétique.

L'ASPIRINE

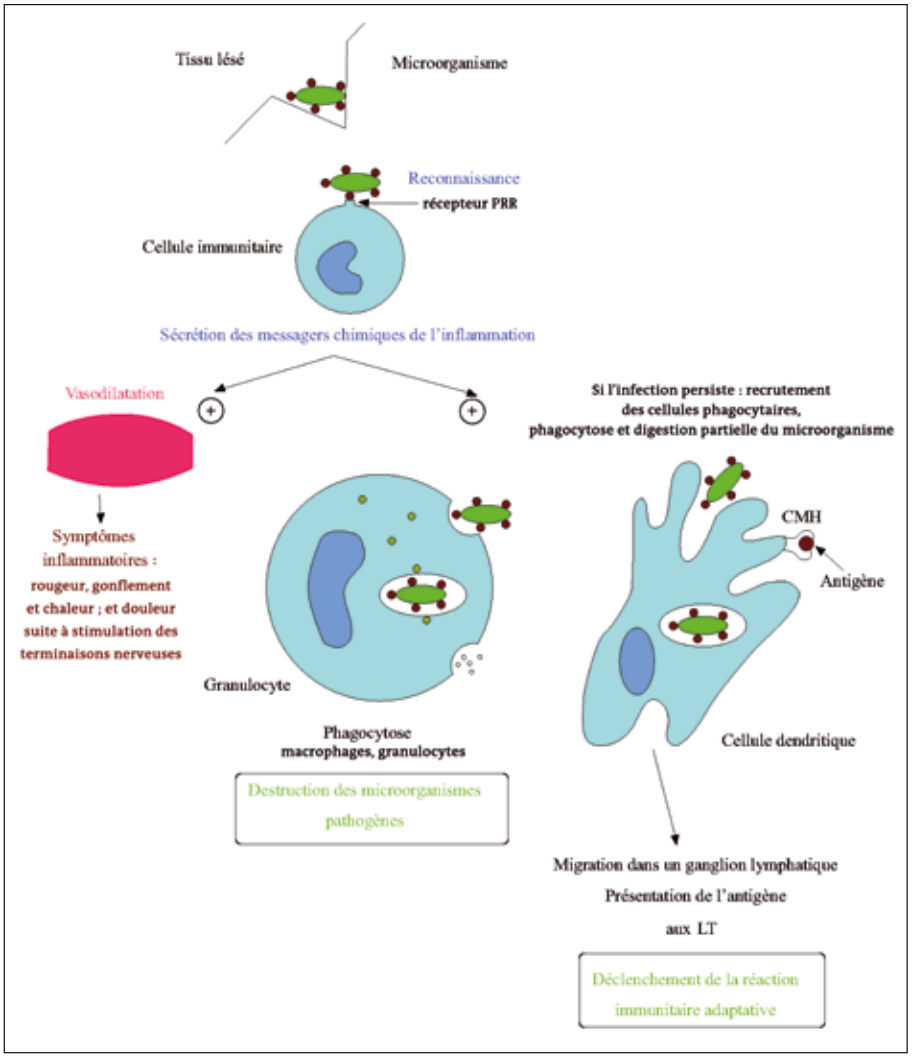
Depuis l'Antiquité, des décoctions d'écorce de saule, contenant de l'acide salicylique, étaient utilisées contre la douleur et la fièvre. En 1899, la société Bayer commercialise l'acide acétylsalicylique obtenu par synthèse chimique. Ce n'est qu'en 1971 qu'est élucidé son mécanisme d'action, qui consiste en l'inhibition de la formation des prostaglandines. En plus de ses actions anti-inflammatoire, antalgique et antipyrétique, l'aspirine a une action anticoagulante en limitant l'agrégation des plaquettes et peut être utilisée pour prévenir des maladies cardio-vasculaires. Des études récentes montreraient que l'aspirine à faible dose réduirait les risques de survenue de certains cancers.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

II. L'intérêt de la prescription d'un anti-inflammatoire

Les médicaments anti-inflammatoires, comme l'aspirine, bloquent la sécrétion de certains médiateurs chimiques de l'inflammation. Ils permettent de limiter la vasodilatation, la douleur ou la chaleur.

Ainsi, les anti-inflammatoires permettent de réduire certains symptômes de la réaction inflammatoire aiguë sans empêcher le déroulement des mécanismes immunitaires qui permettent de lutter contre les micro-organismes pathogènes et qui sont donc bénéfiques à l'organisme.



Conclusion

Ainsi, lors d'une chute, une réaction inflammatoire aiguë se met en place rapidement. Elle se caractérise par des symptômes stéréotypés. En faisant intervenir des cellules immunitaires et des médiateurs chimiques, elle vise à éliminer les agents pathogènes présents sur les lésions cellulaires. Si nécessaire, la RIA déclenche l'activation de l'immunité adaptative qui interviendra par la suite. Les anti-inflammatoires permettent de réduire les symptômes de l'inflammation sans diminuer l'efficacité de celle-ci. Quels sont alors les mécanismes immunitaires mis en jeu dans la réponse immunitaire adaptative ?

Ce qu'il ne faut pas faire

- Ne pas tenir compte des deux parties de la réponse imposées par l'énoncé.
- Ne pas faire de schéma(s).

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents

– Étude des mécanismes de la réaction inflammatoire aiguë : cellules immunitaires, molécules de l'inflammation.
– Étude des modes d'action des anti-inflammatoires.
– Mise en évidence de la conservation des molécules de l'immunité innée lors de l'évolution.

ZOOM SUR…

LES RÉCEPTEURS DE L'IMMUNITÉ INNÉE : LES PRR

Pendant longtemps, on pensait que les mécanismes de l'immunité ne faisait pas intervenir la reconnaissance spécifique des pathogènes. Or, dans les années 1980 furent découvertes chez les cellules de l'immunité innée (mastocytes, macrophages, granulocytes, cellules dendritiques) des récepteurs cellulaires, appelés PRR pour *Pattern Recognition Receptors*, capables de reconnaître les pathogènes. Les éléments pathogènes présentent des motifs moléculaires caractéristiques appelés PAMP (*Pathogen Associated Molecular Patterns*) qui sont reconnus par les PRR des cellules de l'immunité innée.

Les PAMP sont des molécules abondantes des micro-organismes : les acides nucléiques (ADN ou ARN) constituent les PAMP des virus, alors que les mannanes constituent les PAMP des champignons. Les PRR reconnaissant les PAMP sont localisés à la surface des cellules immunitaires ou à l'intérieur de ces cellules : ces localisations augmentent la possibilité de rencontre entre les PRR et les PAMP.

LES RÉCEPTEURS DE L'IMMUNITÉ INNÉE : DES MOLÉCULES TRÈS CONSERVÉES

On distingue plusieurs familles de récepteurs de l'immunité innée ou PRR. Chez la drosophile, l'infection par un champignon entraîne sa reconnaissance par les récepteurs appelés « Toll », présents sur des cellules immunitaires de l'insecte et déclenchant l'élimination de ce pathogène. Chez les mammifères, une famille de récepteurs proches des récepteurs de la drosophile a été identifiée récemment : il s'agit des récepteurs TLR pour *Toll Like Receptors*. Ainsi les récepteurs de l'immunité innée semblent fortement conservés lors de l'évolution.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'inflammation, mal du siècle

Moyen de défense rapide de l'organisme, l'inflammation fait aussi le lit de nombreuses maladies : athérosclérose, diabète, cancers, affections neurodégénératives, de l'intestin ou des articulations, dépression… En cause, la vie moderne, qui percute notre physiologie façonnée par l'évolution.

L'inflammation, chacun de nous l'a déjà éprouvée dans sa propre chair. Ça rougit et ça gonfle ; ça brûle et ça lance. C'est, en réalité, une réaction de défense normale de notre corps, face à une agression : infection, blessure physique, tumeur… Partout, dans notre corps, des cellules sentinelles patrouillent. Dès qu'elles détectent un signal suspect, elles envoient des « molécules SOS ». Très vite, les soldats de l'inflammation accourent. C'est que l'enjeu est vital.

Les armes de cette immunité innée ont été rodées depuis des centaines de milliers d'années. Il s'agissait de juguler nos ennemis ancestraux : ces hordes sournoises de microbes, ces dents et ces griffes des grands prédateurs, ces défenses de mammouths, ces massues des tribus rivales… L'inflammation, ou comment protéger l'humanité chancelante, livrée à un milieu hostile.

Et pourtant. *« L'inflammation est-elle notre amie ou notre ennemie ? »*, s'interroge le professeur Charles Serhan, de l'Ecole de médecine d'Harvard (Massachusetts, Etats-Unis). *« C'est une arme critique pour notre survie. Mais un excès d'inflammation fait le lit de nombreuses maladies chroniques. »*

Depuis trente ans, sa face sombre se révèle peu à peu. Et l'on découvre l'ampleur des dégâts. Elle a beau œuvrer à bas bruit, cette inflammation, quand elle devient chronique, n'en est pas moins la plus meurtrière des pandémies : diabète de type 2, infarctus du myocarde et accidents vasculaires cérébraux, obésité, cancers, asthme, maladies neurodégénératives et psychiatriques, maladies inflammatoires chroniques de l'intestin ou des articulations, psoriasis… La liste est longue de ces « maladies de civilisation » qui nous minent, sous l'attaque sournoise et répétée d'une alimentation trop riche et d'une sédentarité trop grande. Aucun pays n'est épargné.

« Nous sommes passés, en une centaine d'années, de l'ère des maladies infectieuses à l'ère de l'hygiène et des antibiotiques », résume la professeure Karine Clément, spécialiste des maladies cardiométaboliques à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris. L'ère, également, de l'agriculture industrielle, de la révolution des transports et de l'informatique.

Les forces de pression évolutives qui, durant des centaines de milliers d'années, se sont exercées sur l'humanité de l'ère préindustrielle ne pouvaient anticiper cette révolution qui, au XXe siècle, allait tout bouleverser – pour le meilleur et pour le pire. Elles ont retenu ceux qui survivaient aux infections, aux famines et aux griffes des grands fauves. Comment ? En sélectionnant trois caractères. Pour résister aux infections, il fallait un système immunitaire hyperactif. Revers de la médaille aujourd'hui : une tendance accrue à l'inflammation chronique. Pour résister aux famines, il fallait pouvoir stocker facilement le gras. Revers de la médaille aujourd'hui : une tendance au diabète et à l'obésité. Pour résister aux blessures, il fallait un sang qui coagule facilement. Revers de la médaille aujourd'hui : une tendance à la formation de caillots sanguins, menaçant de boucher nos artères.

Une armée de l'ombre, œuvrant et communiquant par une myriade d'acteurs cellulaires et de molécules chimiques, nomade par essence, élusive : la complexité de notre système immunitaire explique qu'on ait longtemps méjugé son rôle dans cette pandémie moderne.

Il a fallu attendre la fin du XXe siècle pour mieux cerner la coupable. Et comprendre que, quand cet incendie n'est pas éteint, il ronge à petit feu notre organisme. Corrode nos artères. Gangrène notre tissu graisseux. Abîme notre cœur et notre cerveau. Sape nos poumons et notre intestin. Attaque nos articulations. Mine nos muscles et notre foie…

Premier tissu concerné : la graisse corporelle. *« Longtemps le tissu adipeux n'a pas été jugé noble, raconte Karine Clément. Et puis, dans les années 1990, on s'est aperçu qu'il n'était pas qu'un sac inerte rempli de graisse. »* Les personnes obèses ont des taux sanguins accrus de marqueurs de l'inflammation, découvre-t-on. Dont la fameuse CRP, cette protéine plus abondante dans le sang des patients atteints de maladies chroniques inflammatoires.

Altération de tous les organes

Les cellules adipeuses, quand elles se gonflent de gras, fabriquent des messagers de l'inflammation (TNF-alpha, interleukines…), montre-t-on ensuite. Ceux-ci attirent des cellules de l'immunité qui s'accumulent. *« Chez les personnes obèses, les gènes de l'inflammation sont très fortement activés dans ces cellules »*, relève Karine Clément. Sous l'action des messagers sanguins, l'inflammation gagne tout l'organisme. *« Le fonctionnement de tous les organes est altéré. »*

Dont le cerveau. Une étude publiée dans *Cell Metabolism*, le 3 janvier, livre un résultat étonnant. Dans un modèle de souris obèses, les chercheurs ont observé une sénescence accrue des cellules immunitaires du cerveau, ou « microglie ». *« Ces cellules sénescentes sont un moteur-clé de l'anxiété induite par l'obésité »*, indiquent les auteurs, de la Mayo Clinic (Etats-Unis). Elles altèrent la production de nouveaux neurones (neurogenèse) chez l'adulte. En les éliminant, ils sont parvenus à restaurer une neurogenèse et à réduire l'anxiété des rongeurs.

Et l'athérosclérose, ce fléau mondial ? Ce processus d'érosion des artères a été disséqué. L'offensive commence par un dépôt de graisses (LDL-cholestérol) dans la paroi des artères, où il subit une oxydation. *« C'est là qu'entre en jeu l'inflammation,* raconte Alain Tedgui, Grand Prix 2018 de l'Inserm (Hôpital européen Georges-Pompidou à Paris). *Ce LDL oxydé attire des globules blancs du sang, qui pénètrent dans la plaque. Là, ces cellules se gorgent de LDL oxydé. »* Cette boule de graisse grossit, devient plaque d'athérome. *« Les macrophages qu'elle renferme sont totalement inaptes à nettoyer les dégâts. »* Ils meurent, forment des débris qui s'accumulent. Mais ils hébergent des molécules qui favorisent la coagulation : une bombe à retardement. *« Plus tard, quand la plaque se fissurera, ils entreront en contact avec le sang : d'où la formation d'un caillot. »* Et ce sera l'accident, brutal et ravageur : l'infarctus ou l'AVC.

Là encore, l'immunité apparaît mi-ange, mi-démon, comme le montreront Alain Tedgui et Ziad Mallat. Certaines molécules anti-inflammatoires, par exemple, sont protectrices (IL-10 et TGF-bêta). Autre découverte : chez des souris ayant fait un infarctus, la taille des plaques peut être réduite par un médicament « anti-CD20 », qui inhibe les cellules délétères.

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'inflammation, réaction de l'immunité innée, nous protège des agents pathogènes extérieurs et maintient donc l'intégrité de l'organisme. Mais depuis une trentaine d'années, les résultats des recherches sur l'inflammation montrent que dans nos sociétés actuelles, l'organisme peut être le siège d'une inflammation chronique, associée à de nombreuses maladies actuellement en plein essor. **Cet article fait un bilan très complet des découvertes récentes sur le lien entre ces pathologies et l'inflammation et montre comment les modifications récentes de notre mode de vie contribuent sans doute au développement de ces maladies dans le monde.** De nombreuses questions restent à élucider concernant les relations entre l'inflammation et ces maladies, et leur résolution devrait ouvrir la voie à de nouvelles thérapies dans le futur.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Suite logique : chez l'homme, deux essais cliniques préliminaires sont en cours à l'université de Cambridge (Royaume-Uni), sous la direction de Ziad Mallat. Tous deux concernent un petit nombre de patients ayant fait un infarctus. Tous sont sous statine, bêta-bloquant et IEC (la triade médicamenteuse classique après un tel accident). Le premier essai évalue, en sus, de faibles doses d'IL-2 pour favoriser l'expansion de cellules bénéfiques. Le second essai teste l'effet d'un anti-CD20.

Les affections psychiatriques aussi sont concernées. « Depuis les travaux de Robert Dantzer, à l'Inserm de Bordeaux, on sait que des cytokines pro-inflammatoires agissent sur le cerveau », indique Pierre Ellul, du service de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent à l'hôpital Robert-Debré (AP-HP). Environ 30 % à 45 % des patients déprimés présentent des taux accrus de CRP, ce marqueur de l'inflammation. *« Ils répondent moins bien aux antidépresseurs classiques. »* Pour le moment, le concept reste théorique. *« Mais, dans cinq à dix ans, cela pourrait changer. »*

C'est une retombée inattendue de l'inflammation : elle jette des ponts entre disciplines. Parce qu'elle est un moteur commun de nombreuses affections, on comprend leur association fréquente chez une même personne. Ainsi les patients atteints de polyarthrite rhumatoïde (une maladie inflammatoire des articulations) souffrent-ils plus souvent d'athérosclérose ; les patients diabétiques ou obèses font plus souvent des cancers ou des accidents cardio-vasculaires ; tous, aussi, souffrent plus de dépressions sévères. *« Que les patients atteints de maladies chroniques soient plus déprimés, cela semble logique. Mais ce lien est plus fort avec les maladies inflammatoires »*, relève Pierre Ellul.

Pour la même raison, on comprend les bénéfices collatéraux d'un traitement anti-inflammatoire, prescrit contre une maladie, sur les autres pathologies associées d'un patient. Ici, les exemples abondent. *« Nous soignons des enfants atteints de lupus sévère »*, raconte Pierre Ellul. Beaucoup ont des dépressions associées, qui résistent aux antidépresseurs. *« Mais quand nous traitons ces lupus par des thérapies ciblant l'inflammation, nous guérissons souvent ces dépressions. »*

Plus inattendu encore : en 2017, les résultats de l'essai Cantos étaient publiés dans le NEJM. Portant sur plus de 10 000 patients ayant une CRP élevée, cet essai évaluait l'impact d'une molécule médicament ciblant l'inflammation (le canakinumab, un anti-IL-1bêta de Novartis) sur le risque d'accident cardio-vasculaire. Ce médicament diminuait ce risque. Mais, en plus, il a fait chuter la mortalité par cancer du poumon et le risque d'arthrite ou de goutte…

Les cancers, maintenant. *« Le rôle de l'inflammation est très exploré. Il est très variable selon les types de tumeurs. Dans les cancers du sein "triple négatif", par exemple, on voit beaucoup de cellules inflammatoires autour des tumeurs. Mais pas dans les cancers du sein hormono-dépendants »*, indique le professeur Christophe Le Tourneau, responsable du département d'essais cliniques précoces et d'innovation de l'Institut Curie (Paris et Saint-Cloud). Les cancers colorectaux, par ailleurs, sont associés aux maladies inflammatoires chroniques de l'intestin ; les cancers du foie, à certaines hépatites…

La question de la poule et de l'œuf

« L'inflammation chronique est responsable de près de 20 % de tous les décès par cancer dans le monde », estime Shawn Demehri, de l'hôpital général du Massachusetts, dans les PNAS en février. Son équipe a identifié deux déclencheurs d'une inflammation chronique qui favorise des cancers de la peau et du côlon chez la souris. Il s'agit d'un messager chimique, l'IL-33, et d'une catégorie de cellules, des lymphocytes T régulateurs. Leur blocage prévient ce risque de cancers.

L'inflammation chronique a d'autres effets pernicieux. Elle s'est révélée associée à un déclin cognitif accru. La preuve : pendant vingt ans, une équipe de l'université Johns Hopkins, à Baltimore (Etats-Unis), a suivi 12 336 individus, âgés de 57 ans en moyenne au début de l'étude. Résultats, publiés le 13 février dans *Neurology* : au bout de vingt ans, le déclin cognitif était supérieur de 12 % chez ceux qui avaient, en début d'étude, les taux les plus élevés de CRP, un des marqueurs de l'inflammation.

Un doute surgit ici. Cette inflammation est-elle la cause ou la conséquence de ces maladies ? Le débat n'est pas clos. *« C'est l'éternelle question de la poule ou de l'œuf*, observe Alain Bessis, directeur de recherche au CNRS et professeur attaché à l'ENS (Paris). *Par exemple, on sait depuis longtemps que des cellules immunitaires du cerveau, la microglie, sont activées dans toutes les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson, sclérose en plaques…) ou psychiatriques (dépression, autisme, schizophrénie…). »* Mais la place de cette inflammation reste incertaine. En tout cas, elle entretient le cercle vicieux.

« L'inflammation chronique est absolument causale, puisque, si vous interférez avec elle, vous pouvez inverser le cours de ces maladies », assure de son côté Gökhan Hotamisligil, de l'Ecole de santé publique d'Harvard, dans le magazine d'Harvard (mai-juin 2019). Il cite l'exemple du diabète : si vous rendez une mouche diabétique, et qu'ensuite vous bloquez la réponse inflammatoire, vous guérissez son diabète. De même chez la souris, le singe et l'homme, avec les bons outils de blocage. *« Bien sûr, plus l'espèce est évoluée, plus les voies de l'inflammation sont complexes. Si bien qu'il est plus difficile d'identifier les processus exacts à manipuler. »*

Et les maladies inflammatoires des articulations, comme la polyarthrite rhumatoïde ? *« La compréhension des mécanismes de l'inflammation a permis d'identifier des cibles pour développer des traitements très efficaces »*, résume le professeur Pascal Richette, rhumatologue à l'hôpital Lariboisière à Paris (il déclare des liens d'intérêts avec Pfizer, Lilly, Roche, Celgene). Parmi ces cibles, le TNF-alpha et l'IL-6, qu'inhibe une panoplie de molécules aux noms étranges (infliximab, adalimumab, étanercept, tocilizumab, canakinumab…), apparues depuis une vingtaine d'années. Et franchement, il est rare qu'un médicament puisse changer à ce point la vie des malades – auparavant très handicapés par des douleurs et la perte de fonction des articulations touchées. Au prix, certes, d'un risque accru de certaines infections. *« Mais, globalement, ces traitements sont bien tolérés, en regard de leur efficacité. »*

Au fond, la question est : pourquoi cette inflammation à bas bruit persiste-t-elle ? C'est ici qu'entre en scène le professeur Charles Serhan. Il a déterré un trésor : une superfamille de molécules qui, après la phase aiguë de l'inflammation, viennent éteindre ce feu. Il les a nommés « SPM ». Résolvines, protectines, marésines, lipoxines : autant de petits lipides qui, en temps normal, mettent fin à cet incendie.

« Charles Serhan est sur ma liste personnelle des nobélisables, confie Jean-Marc Cavaillon, de l'Institut Pasteur. *Son travail sur la compréhension de la résolution de l'inflammation est admirable. »* Pourquoi ces molécules sont-elles, parfois, impuissantes à combattre ce feu ? Peut-être sont-elles débordées, l'incendie couvant sans répit. Peut-être sont-elles altérées. *« En cas d'obésité et de diabète de type 2, les résolvines sont perturbées »*, note Karine Clément. Ces molécules ou leurs avatars de synthèse (seuls à être brevetables !) sont à l'étude, chez l'animal et l'homme.

Effets bénéfiques de l'activité physique

Mais le plus simple, pour limiter ce feu, n'est-il pas d'adopter des modes de vie favorables ? Le sport, d'abord. A court terme, on sait qu'une activité physique intense induit une inflammation aiguë, vite résolue. Mais, à long terme, un exercice physique régulier, au contraire, a des effets anti-inflammatoires. En témoigne cet essai retentissant, publié en 2007 dans la revue Circulation. Au total, 27 055 femmes ont été suivies sur onze ans. Verdict : un tiers environ des bienfaits de l'activité physique régulière sur le risque d'accidents cardio-vasculaires ont été attribués à une baisse de l'inflammation. Et la nutrition ? Une restriction calorique chronique abaisse les marqueurs de l'inflammation. Pas facile à mettre en pratique. Mieux vaut privilégier une alimentation riche en « bons acides gras » nécessaires à la fabrication des SPM, ces « pompiers de l'inflammation ». On les trouve principalement dans les poissons gras, certaines algues, des œufs, de la viande de poulet ou de bœuf. *« Bien sûr, il ne suffit pas de manger du poisson pour avoir ces bons acides gras. Mais cela ne peut pas faire de mal ! »*, estime Jean-Marc Cavaillon. Une alimentation vertueuse ? Plus facile à dire qu'à faire. Car l'évolution ne nous a guère sélectionnés pour nos aptitudes à apprécier les choux de Bruxelles. Bien au contraire : elle a favorisé notre appétence pour le sucre et le gras. Peut-on lui en vouloir ? Si nous sommes là aujourd'hui, c'est parce que nos ancêtres sont passés au travers de son filtre implacable. ●

Florence Rosier, *Le Monde* daté du 15.05.2019

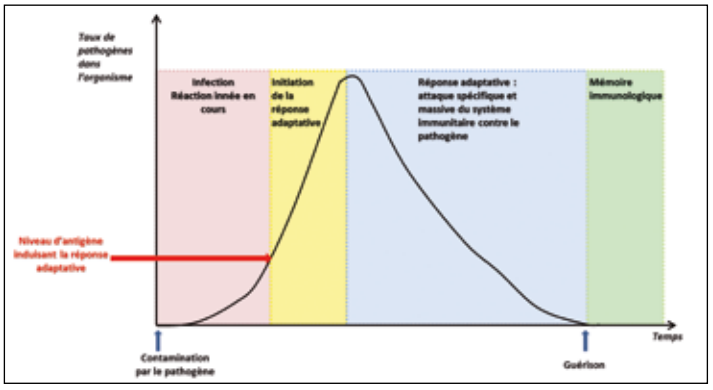
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée

L'immunité innée est présente chez tous les êtres vivants. Mais chez les vertébrés s'est développée une réponse immunitaire plus spécifiquement dirigée contre le pathogène et dotée d'une mémoire : l'immunité adaptative. Cette réponse se met en place en parallèle de la réponse innée, avec quelques jours de délai. Quelles en sont les caractéristiques ?

La réponse immunitaire adaptative

Suite à la réaction inflammatoire, des **cellules dendritiques** phagocytent sur les sites de l'infection l'agent infectieux, dont les fragments protéiques constituent des **antigènes**. Sur ces cellules dendritiques, les antigènes sont exposés au sein de molécules spécifiques appelées « **complexe majeur d'histocompatibilité** » (CMH). Les cellules dendritiques migrent vers des ganglions lymphatiques, où elles rencontrent de nombreux **lymphocytes T** (LT). Les LT expriment à leur surface des récepteurs T, appelés « **TCR** » (***T Cell Receptors***), associés à d'autres molécules de surface comme **CD4** ou **CD8**. Les LT CD4 portent le récepteur CD4 et le TCR, qui est identique pour un même clone de LT CD4. Le TCR des LT CD4 interagit avec le **peptide antigénique** présenté par le CMH des cellules dendritiques. Cette reconnaissance spécifique entraîne l'activation des LT CD4, qui sécrètent alors des cytokines, comme l'**interleukine 2** (IL2). IL2 est un médiateur soluble de communication qui induit la prolifération clonale puis la différenciation des LT CD4 l'ayant



Chronologie de la réponse immunitaire

secrétée en **lymphocytes T auxiliaires**. Ainsi, les cellules dendritiques sont des **cellules présentatrices de l'antigène** activant la formation de LT auxiliaires, dont la fonction est de sécréter des molécules activant les cellules immunitaires.

Les **lymphocytes B** (LB) portent à leur surface un récepteur appelé « **BCR** » (***B Cell Receptor***), qui correspond à un **anticorps membranaire**. Tous les anticorps membranaires d'un même LB ou d'un même clone de LB sont identiques.

La reconnaissance spécifique entre un BCR et l'antigène correspondant entraîne l'activation du LB. Les LT auxiliaires, présentant la même spécificité pour l'antigène que les LB, sécrètent l'interleukine 2, qui stimule la prolifération clonale puis la différenciation de ces LB en **plasmocytes sécréteurs d'anticorps**. Les anticorps sécrétés par les plasmocytes issus d'un même clone de LB ont tous la même spécificité pour l'antigène.

Un **anticorps** ne reconnaît qu'un seul type d'antigène. L'anticorps possède, en effet, une partie constante et une partie variable, qui reconnaît l'antigène. Les anticorps permettent la **neutralisation de l'antigène**. Ils sont produits en grande quantité par les plasmocytes et se fixent sur les virus , sur des antigènes solubles ou recouvrent des bactéries. Il y a formation de complexes immuns. Cette fixation empêche les virus d'infecter leurs cellules-cibles. La partie constante des anticorps est reconnue par des récepteurs membranaires des cellules phagocytaires, qui éliminent l'agent infectieux recouvert d'anticorps par **phagocytose**. Ainsi, l'intervention des LB sécréteurs d'anticorps ou plasmocytes constitue **l'immunité adaptative à médiation humorale**, spécifique de l'antigène et qui nécessite l'intervention des LT auxiliaires.

Les cellules infectées par des virus, sont détruites par les **lymphocytes T cytotoxiques** (LTc). Dans les ganglions lymphatiques, des cellules présentatrices de l'antigène expriment au sein de leur

ZOOM SUR...

ANTICORPS

Glycoprotéines synthétisées par les plasmocytes que l'on retrouve dans le plasma et dans d'autres liquides biologiques. Les anticorps sont aussi appelés « immunoglobulines » car ils sont retrouvés après électrophorèse dans des protéines du sérum, dans les différentes fractions (α, β et γ) des globulines. Chez l'homme, les anticorps ont pour forme un Y composé de quatre chaînes peptidiques (deux chaînes lourdes identiques et deux chaînes légères identiques). Chaque anticorps possède deux sites de fixation aux antigènes situés aux extrémités variables des chaînes légères et des chaînes lourdes. On distingue cinq classes d'immunoglobulines : IgG, IgM, IgA, IgE et IgD, en fonction de la nature de la région constante de la chaîne lourde. La séropositivité pour un antigène donné correspond à la présence dans le sérum d'anticorps dirigés contre cet antigène et signe l'activation du système immunitaire en réponse à la présence d'un antigène.

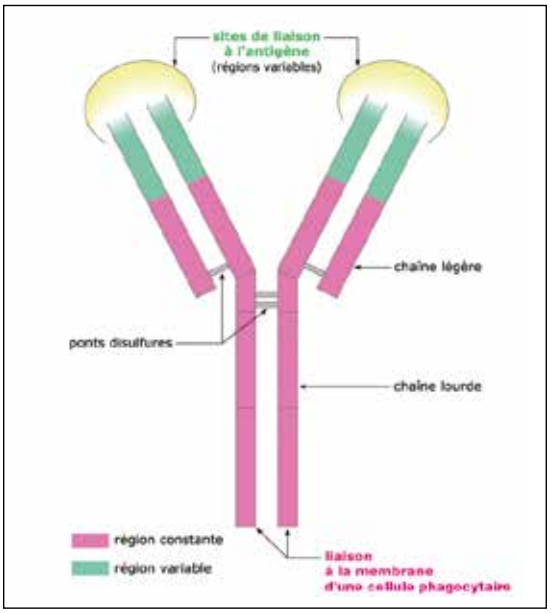
ANTIGÈNE

Toute structure moléculaire pouvant être reconnue par un récepteur de l'immunité adaptative, soit un anticorps, soit un TCR (récepteur des LT), soit un BCR (récepteur des LB) et déclenchant ainsi une réponse immunitaire adaptative.

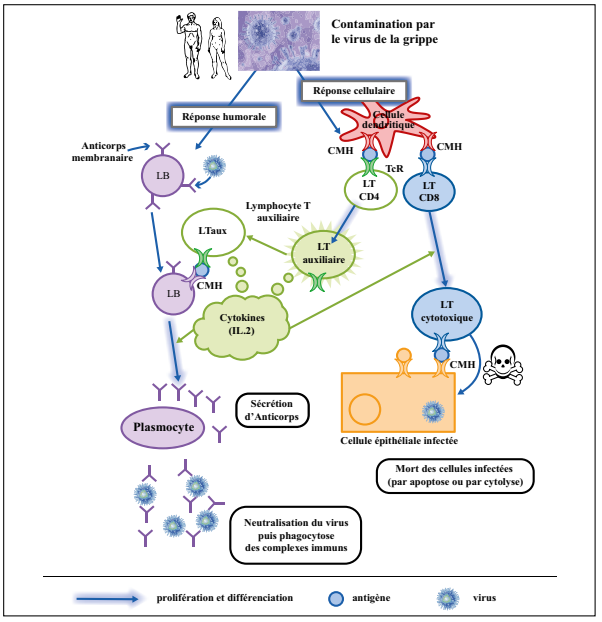
CELLULES PRÉSENTATRICES D'ANTIGÈNE (CPAG)

Les CPAg constituent une catégorie de phagocytes capables d'exprimer à leur surface des déterminants antigéniques liés à des protéines du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH). Il s'agit, par exemple, des cellules dendritiques et des macrophages. Ces cellules sont au cœur de la coopération entre l'immunité innée et l'immunité adaptative.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Structure d'un anticorps



Lutte contre le virus de la grippe

CMH l'antigène, qui est reconnu spécifiquement par le TCR des LT, porteurs également du récepteur CD8. Cette reconnaissance entraîne l'activation des LT CD8, qui prolifèrent puis se différencient en LT cytotoxiques. Cette prolifération et cette différenciation nécessitent la stimulation par l'interleukine 2, secrétée par les LT auxiliaires activés par le même antigène. Les LT cytotoxiques se fixent par leur TCR à l'antigène présenté au sein du CMH de la cellule infectée et libèrent des molécules cytotoxiques la détruisant. Les LT cytotoxiques constituent l'**immunité adaptative à médiation cellulaire**, spécifique de l'antigène et nécessitant les LT auxiliaires.

Le VIH induit un syndrome d'immunodéficience acquise (sida)

Le **virus de l'immunodéficience humaine** (VIH) infecte et détruit différentes cellules, dont principalement les LT CD4. Le patient est dit **séropositif pour le VIH** quand il produit des anticorps anti-VIH.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

• **Le Nobel sacre la percée de l'immunothérapie du cancer** p. 76
(Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 03.10.2018)
• **L'infection par le VIH ne recule plus en France** p. 77
(Paul Benkimoun, *Le Monde* daté du 28.03.2019)

Pendant quelques années, le système immunitaire fait diminuer le taux de virus dans le sang. Mais le VIH, toujours présent dans l'organisme, détruit les LT CD4, désorganisant le système immunitaire. Le patient est dit « **atteint du sida** » quand il développe des maladies opportunistes, pouvant entraîner son décès. Les **trithérapies** actuelles retardent l'évolution de la maladie mais n'éradiquent pas le VIH de l'organisme.

La maturation du système immunitaire

Tous les lymphocytes sont produits dans la moelle osseuse, ils acquièrent leur immunocompétence dans le thymus pour les LB, dans la moelle osseuse pour les LT. La **grande diversité des récepteurs BCR des LB et TCR des LT**, capable de reconnaître une multitude d'antigènes, est le résultat aléatoire de mécanismes génétiques complexes. Puis, les LB et LT capables de reconnaître les constituants de l'organisme et dits **auto-réactifs**, sont éliminés. À l'issue de cette sélection négative, les LB et LT sont dits **naïfs** : ils n'ont pas encore rencontré leur antigène. Ces lymphocytes migrent dans les organes lymphoïdes secondaires (comme les ganglions lymphatiques), où ils sont susceptibles de rencontrer leur antigène. La **maturation du système immunitaire** est donc le produit d'un équilibre dynamique entre production de cellules immunitaires et élimination des cellules immunitaires auto-réactives.

CHIFFRES CLÉS

LE SIDA EN FRANCE

Au total, en 2009, 83 000 personnes ont développé un sida depuis le début de l'épidémie dans les années 1980, et 46 000 malades en sont décédés. En 2009, 1 450 nouveaux cas de sida ont été déclarés.

En 2009, on estime à environ 152 000 le nombre total de personnes infectées en France par le VIH, dont environ 50 000 ne connaîtraient pas leur séropositivité.

Environ 6 300 personnes ont découvert leur séropositivité en 2010 : ce nombre est stable depuis quelques années. 30 % des diagnostics de séropositivité pour le VIH sont établis à un stade tardif, alors que le taux de LT CD4 est déjà faible. Le diagnostic précoce ne concerne que 36 % des séropositivités détectées.

ZOOM SUR…

LA TRANSMISSION DU VIRUS DU SIDA ET LA PRÉVENTION

La transmission du sida a lieu :
– lors de rapports sexuels (80 % des cas). Prévention par utilisation de préservatifs masculin ou féminin ;
– lors d'une contamination par le sang (transfusion sanguine, seringue contaminée). Prévention par utilisation de matériel stérile et à usage unique ;
– de la femme enceinte à l'enfant, lors de la grossesse, à l'accouchement ou lors de l'allaitement. Dans les pays industrialisés, les traitements ont réduit presque totalement le risque de la transmission de la mère à l'enfant. Prévention par prise en charge médicale pendant la grossesse, naissance par césarienne, utilisation exclusive de lait artificiel et traitement post-natal de l'enfant.

De fausses croyances persistent sur la transmission du virus. Il ne peut pas se transmettre par la salive, la sueur, les larmes, les piqûres d'insectes ou encore le toucher.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.1 : Greffe de peau chez la souris

L'intitulé complet du sujet

On sait que les greffes de tissus ne sont possibles que si le donneur et le receveur sont compatibles. On cherche à préciser les mécanismes immunitaires impliqués dans le rejet d'une greffe de peau chez la souris.

Exploitez l'ensemble des résultats expérimentaux proposés dans le document et montrez qu'ils sont en accord avec l'hypothèse selon laquelle le rejet de greffe chez la souris repose sur des mécanismes d'immunité adaptative impliquant des effecteurs cellulaires.

Le document

Quelques résultats expérimentaux chez les souris

Des greffes de peau ont été réalisées chez des souris de lignées pures (homozygotes pour tous leurs gènes) appelées lignées A et lignées B. On observe que :

– un greffon de peau issu d'une souris de lignée B implanté à une souris de lignée B est toujours accepté ;

– un greffon de peau issu d'une souris de lignée A implanté à une souris de lignée B est parfaitement fonctionnel six jours après la greffe, mais totalement détruit au bout de onze jours ;

– une souris de lignée B ayant précédemment rejeté un premier greffon issu d'une souris de lignée A rejette un deuxième greffon de souris de lignée A en six jours.

Des souris de lignée B sont dites "hyperimmunisées" lorsqu'on leur a greffé à trois reprises, à trois semaines d'intervalle, de la peau de souris de lignée A. Les chercheurs prélèvent alors chez ces souris d'une part leur sérum (plasma sanguin) et d'autre part des cellules lymphoïdes dans les ganglions lymphatiques situés près du greffon. Des souris de lignée B sont dites "neuves" (notées BN) si elles n'ont subi aucun traitement. »

Expérience 1

Des souris de lignée B « neuves » (BN) reçoivent le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées, puis trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A. Onze jours plus tard, le greffon est rejeté, alors qu'il était entièrement fonctionnel jusqu'au sixième jour.

Expérience 2

D'autres souris BN reçoivent des injections au jour 1, une greffe de peau issue d'une souris de lignée A au jour 3. L'état du greffon est observé au jour 6. Les résultats sont les suivants :

ZOOM SUR…

LE COMPLEXE MAJEUR D'HISTOCOMPATIBILITÉ

Le complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) est l'ensemble de six gènes principaux (A, B, C, DR, DQ, DP) situés, chez l'homme, sur la paire de chromosomes 6 et codant des glycoprotéines de surface qui interviennent dans le rejet de greffes et la reconnaissance du soi modifié. Chez l'homme, le complexe majeur d'histocompatibilité est appelé « système HLA » (*Human Leucocytes Antigens*). Le complexe majeur d'histocompatibilité forme un ensemble de gènes très polymorphes de par un nombre élevé d'allèles : le complexe majeur d'histocompatibilité n'est jamais identique chez deux individus (sauf chez les vrais jumeaux).

LA GRANDE DIVERSITÉ DES RÉCEPTEURS DES CELLULES IMMUNITAIRES

L'immunité adaptative génère, tout au long de la vie, un très grand nombre de récepteurs BCR des lymphocytes B et TCR des lymphocytes T. L'immensité des répertoires B et T permet potentiellement de faire face à une multitude d'antigènes différents. La spécificité des lymphocytes B et lymphocytes T, fondée sur celle des récepteurs qu'ils expriment, est obtenue grâce à un réarrangement au hasard de l'information génétique : au cours de la maturation des lymphocytes dans la moelle osseuse (pour les LB) et dans le thymus (pour les LT), les gènes codant les récepteurs sont construits par combinaison aléatoire de segments de gènes présents dans les futurs lymphocytes B et lymphocytes T. Au cours de ce processus, les lymphocytes perdent une partie de leur génome. Les possibilités de ces réarrangements sont estimées à 10^{18}, alors que seulement 10^{12} à 10^{15} lymphocytes sont présents ou produits dans le corps. Ce réarrangement des gènes s'amorce avant la naissance.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Infection au jour 1	Greffe au jour 3	Résultat au jour 6
de cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B hyperimmunisées	peau de souris de lignée A	la majorité des greffons sont détruits ou présentent des nécroses partielles
de cellules lymphoïdes tuées de souris de lignée B hyperimmunisées	peau de souris de lignée A	les greffons sont toujours fonctionnels
de cellules lymphoïdes vivantes de souris de lignée B non immunisées	peau de souris de lignée A	les greffons sont toujours fonctionnels

Ce qu'il ne faut pas faire

• Se contenter de saisir les données du document sans montrer comment les résultats expérimentaux permettent de valider l'hypothèse formulée par l'énoncé.

Proposition de corrigé

Une greffe de peau entre une souris donneuse et une souris receveuse appartenant à une même lignée homozygote n'est jamais rejetée : les deux souris sont donc compatibles.

Une greffe de peau d'une souris donneuse de la lignée A à une souris receveuse de la lignée B est fonctionnelle au sixième jour mais est rejetée au onzième jour : les souris ne sont pas compatibles.

La greffe de peau d'une souris donneuse de la lignée A à une souris receveuse de la lignée B qui a déjà rejeté un premier greffon issu de A est rejetée beaucoup plus rapidement, en six jours.

Expérience 1

Des souris de lignée B « neuves » (souris NB) n'ayant reçu aucun traitement au préalable reçoivent le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées, puis reçoivent trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A : la greffe n'est rejetée qu'au onzième jour. Les molécules contenues dans le sérum des souris de lignée B hyperimmunisées ne permettent pas un rejet précoce de la greffe au sixième jour chez les souris NB, comme il est observé chez les souris de lignée B hyperimmunisées.

Expérience 2

Des souris BN reçoivent les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B hyperimmunisées, puis reçoivent trois jours plus tard une greffe de peau de souris de lignée A : le greffon est rejeté dès le sixième jour. Les souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B hyperimmunisées réagissent à la greffe comme les souris de lignée B hyperimmunisées, comme si elles avaient déjà été en contact avec le greffon et l'avaient rejeté.

De plus, la greffe des souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes tuées des souris de lignée B hyperimmunisées entraîne un greffon encore fonctionnel au sixième jour. Les cellules lymphoïdes injectées doivent donc être vivantes pour entraîner le rejet du greffon au sixième jour.

Enfin, la greffe des souris BN ayant reçu les cellules lymphoïdes vivantes des souris de lignée B non immunisées entraîne un greffon encore fonctionnel au sixième jour. Pour entraîner un rejet précoce du greffon, les cellules lymphoïdes injectées vivantes doivent provenir de souris hyperimmunisées.

Ainsi, les cellules lymphoïdes contenues dans les ganglions lymphatiques des souris sont responsables du phénomène de rejet lors des greffes entre donneur et receveur non compatibles. La réponse immunitaire est d'autant plus rapide que le receveur a déjà été en contact avec l'antigène : cela justifie donc le caractère adaptatif de cette réponse immunitaire.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances : question de synthèse

– Présenter les réactions immunitaires de l'immunité adaptive en s'appuyant sur l'exemple d'une infection virale, la grippe.
– Présenter le recrutement des LB et leur fonction dans l'élimination des agents pathogènes.
– Présenter le recrutement des LT cytotoxiques et leur fonction dans l'élimination des cellules infectées par des virus.
– En s'appuyant sur l'exemple du sida, montrer le rôle central des LT auxiliaires dans la réponse immunitaire adaptative.

ZOOM SUR…

LA GREFFE D'ORGANES

La greffe ou transplantation d'organes est le remplacement d'un organe ou d'un tissu défectueux par un organe ou un tissu sain, appelé « greffon » et provenant de la personne greffée ou d'un autre donneur. La greffe d'organes est parfois la seule issue thérapeutique lorsque les organes vitaux sont atteints de manière irréversible.

En 2011, en France, 40 000 personnes vivent avec un greffon fonctionnel. 4 945 personnes ont été greffées en 2011 : le rein est la greffe la plus courante (60 %), suivie de celle du foie (26 %), du cœur (8 %), puis du poumon et du pancréas. De 1991 à 2011, le nombre de greffes a augmenté de 41 % mais cette augmentation ne suffit pas à résorber l'attente : 16 371 patients étaient en attente d'un greffon en 2011, soit presque le double par rapport à 1997.

Le greffon étranger à l'organisme peut déclencher une réaction immunitaire de rejet. Le rejet peut être aigu, ou chronique, entraînant, à terme, la destruction du greffon ou une perte de sa fonctionnalité. Les traitements immunosuppresseurs ont progressé ces dernières années, mais ils s'accompagnent d'un risque accru d'infections et de tumeurs chez le patient. Les recherches se poursuivent pour augmenter la tolérance du système immunitaire pour le greffon, tout en conservant une réactivité vis-à-vis des autres antigènes.

LES MALADIES AUTO-IMMUNES

Les maladies auto-immunes sont dues à l'attaque et à la destruction des cellules de l'individu par son propre système immunitaire. Par exemple, le diabète juvénile ou insulino-dépendant est dû à l'attaque des cellules du pancréas responsables de la synthèse d'insuline ; la sclérose en plaques correspond à l'attaque de la gaine de myéline entourant les cellules nerveuses.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Nobel sacre la percée de l'immunothérapie du cancer

Le Japonais Tasuku Honjo et l'Américain James Allison ont été distingués par l'académie du Karolinska Institute pour leurs travaux sur la régulation de la réponse immunitaire, qui ont abouti à la mise au point de traitements antitumoraux à l'efficacité inédite.

Leurs travaux ont conduit au développement de médicaments qui sauvent la vie à des malades atteints de cancers précédemment incurables. Le prix Nobel de médecine a été attribué lundi 1er octobre à l'Américain James Allison, né en 1948, et au Japonais Tasuku Honjo, né en 1942, pour leur découverte de traitements d'immunothérapie des tumeurs malignes *« par inhibition de la régulation immunitaire négative »*. Si cette prestigieuse récompense (assortie d'un chèque à partager de 9 millions de couronnes suédoises, soit près de 1 million d'euros) ne surprend guère les spécialistes du domaine, elle permettra de faire connaître au public les noms de ces deux chercheurs qui ont ouvert la voie à l'immunothérapie moderne des cancers, une approche reconnue aujourd'hui comme une révolution thérapeutique. En 2014, les deux immunologistes avaient déjà été récompensés conjointement par le prix Tang, version asiatique des Nobel.
Le principe d'utiliser les propres défenses de l'organisme pour combattre une tumeur n'est pas nouveau. Voilà plus de cent ans que des chercheurs et médecins ont eu l'idée de stimuler le système immunitaire (notamment avec des bactéries) pour tenter de faire régresser des cancers. Mais cette option séduisante sur le plan intellectuel est longtemps restée décevante en termes de résultats. En travaillant chacun de leur côté, James Allison et Tasuku Honjo ont réussi là où leurs prédécesseurs avaient échoué. Leur stratégie a été au contraire de desserrer les freins empêchant le système immunitaire d'attaquer les cellules cancéreuses, grâce à des traitements dits « inhibiteurs de checkpoints ("points de contrôle") immunitaires ». Pour prendre une métaphore issue de la conduite automobile, ils ont développé des médicaments efficaces non en appuyant sur l'accélérateur, mais en relâchant la pédale de frein.

Peu d'intérêt de l'industrie

Pendant les années 1990, dans son laboratoire de Berkeley, à l'université de Californie, James Allison a été l'un des chercheurs à remarquer qu'une protéine des lymphocytes T, nommée CTLA-4, exerçait un rôle de frein sur ces globules blancs. *« D'autres équipes de recherche ont exploité ce mécanisme comme une cible pour le traitement des maladies auto-immunes. Allison, cependant, avait une tout autre idée en tête »*, écrit l'académie Nobel. En effet, le chercheur américain avait déjà développé un anticorps qui pouvait se lier au récepteur CTLA-4 et bloquer sa fonction.
Dès 1994, avec son équipe, il teste cette approche chez des souris porteuses de tumeurs. Les résultats sont décrits comme spectaculaires. *« Malgré le peu d'intérêt de l'industrie pharmaceutique, Allison continue ses efforts intenses pour développer un traitement chez l'homme »*, poursuit le comité Nobel. En 2004, James Allison quitte d'ailleurs l'université de Berkeley pour le Memorial Sloan-Kettering Cancer Research Center de New York, afin de participer aux premiers essais cliniques, chez des malades avec un mélanome métastatique. Les résultats positifs de cet anticorps monoclonal appelé ipilimumab seront confirmés à plus grande échelle, dans le mélanome puis dans d'autres tumeurs malignes (poumon, prostate, ovaire, pancréas). *« Il est indispensable de souligner que le professeur Allison a été le premier à appliquer cette approche à l'homme, à une époque où la majorité des scientifiques dans la communauté médicale doutaient de la faisabilité et de l'efficacité de cette stratégie »*, note la Fondation Balzan, qui a distingué le chercheur en 2017, deux ans après le prix Lasker, récompensant des personnalités de la recherche médicale. L'ipilimumab (Yervoy), le premier inhibiteur de points de contrôle immunitaire, a été approuvé aux Etats-Unis et en Europe en 2011.
C'est également au début des années 1990 que Tasuku Honjo a, de son côté, découvert une autre protéine exprimée à la surface des lymphocytes T, le PD-1. Déterminé à explorer ses fonctions, le chercheur japonais a mené une série d'expérimentations dans son laboratoire de l'université de Kyoto. Il a ainsi établi que le PD-1 exerce – comme le CTLA-4 – une fonction de frein sur les lymphocytes T, mais par un mécanisme différent. Depuis, plusieurs anticorps monoclonaux anti-PD-1 ont été développés et deux sont commercialisés, le nivolumab et le pembrolizumab. Ces recherches ont également conduit au développement d'anticorps anti-PD-L1, une protéine présente sur les cellules tumorales qui se lie au récepteur PD-1.
« Ces médicaments ont changé la vie de nos malades, insiste la professeure Caroline Robert, chef de service de dermatologie à l'Institut Gustave-Roussy (Villejuif), l'une des premières en France à avoir testé les inhibiteurs de checkpoints chez des patients avec un mélanome métastatique. *Il y a d'abord eu l'ipilimumab, qui a permis d'obtenir une réponse chez 15 % de ces malades chez qui aucun traitement ne fonctionnait. Avec les anti-PD-1, le taux de réponse est passé à 40 %. Aujourd'hui, certains de nos malades sont toujours en rémission complète avec plus de cinq ans de recul, et même dix ans pour les premiers traités par ipilimumab. »* Pratiquement une guérison, même si les médecins restent réticents à employer ce terme chez des patients auparavant condamnés.

Rémission complète

L'ipilimumab est parfois associé à des inhibiteurs de PD-1 ou PD-L1, et de nouvelles molécules de cette classe thérapeutique sont en cours de développement. C'est grâce à un anti-PD-1 que l'ancien président des Etats-Unis Jimmy Carter avait été, fin 2015, en rémission complète de son cancer, un mélanome avec métastases au foie et au cerveau.
L'immunologiste Eric Vivier, professeur à Marseille et directeur scientifique d'Innate-Pharma, salue lui aussi le choix du comité Nobel. *« C'est une bonne nouvelle pour les malades, pour l'immunologie et pour la recherche fondamentale,* se réjouit-il. *Ces deux chercheurs ont en commun d'avoir fait une découverte fondamentale et de l'avoir accompagnée ensuite, lors des tests précliniques et même cliniques, ce qui est remarquable, d'autant que la recherche en cancérologie n'était pas leur cœur de métier. C'est une preuve de plus, s'il en fallait, qu'il faut laisser de la liberté aux chercheurs. »* Selon l'immunologiste, Tasuku Honjo est l'archétype du scientifique curieux, qui a fait ses premières découvertes sur le récepteur PD-1 au cours d'un programme annexe. *« Son sujet majeur, c'était les lymphocytes B* [producteurs d'anticorps]*, pas les lymphocytes T »*, relève Eric Vivier, qui note cependant que d'autres stratégies d'immunothérapies en cancérologie, comme les CAR T-cells, n'ont pas été récompensées par ce Nobel.
A 74 ans, le lauréat japonais n'est en tout cas pas décidé à raccrocher. *« Je veux continuer ma recherche (…) afin que l'immunothérapie sauve plus de patients atteints du cancer que jamais »*, atil déclaré lors d'une conférence de presse organisée à l'université de Kyoto, où il enseigne.

Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 03.10.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

À l'occasion de la remise du prix Nobel de médecine 2018 à deux chercheurs pionniers du développement de l'immunothérapie, cet article récapitule l'essor récent de cette thérapie anti-cancéreuse. L'immunothérapie vise à stimuler le système immunitaire afin qu'il lutte contre les tumeurs. L'immunothérapie connaît un développement important ces dernières années, notamment par la mise au point d'anticorps monoclonaux qui lèvent l'inhibition du système immunitaire pour lui permettre de détruire les tumeurs. Ce prix Nobel de médecine récompense le Japonais Tasuku Honjo et l'Américain James Allison pour leurs travaux fondamentaux et leurs applications cliniques. L'immunothérapie permet la prise en charge de certains cancers auparavant impossibles à soigner et conduit dans certains cas à une rémission totale. Elle constitue une véritable révolution dans le traitement des cancers et devrait s'enrichir dans le futur de nouvelles thérapies.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'infection par le VIH ne recule plus en France

6 400 personnes ont découvert leur séropositivité en 2017 et la moitié n'avait jamais fait de test de dépistage auparavant.

Environ 6 400 personnes ont découvert qu'elles étaient infectées par le VIH en 2017 et, pour la moitié d'entre elles, à l'occasion de leur premier test de dépistage, indiquent les données de surveillance françaises parues, jeudi 28 mars, dans le bulletin de Santé publique France. Malgré une prévention qui s'est diversifiée ces dernières années, l'infection par le VIH – qui fait l'objet d'une déclaration obligatoire depuis 2003 – ne recule plus depuis des années.

Le nombre de découvertes de séropositivité VIH en France est *« stable entre 2010 et 2017 »*, précise l'agence de santé publique. En 2008, un total de 6 940 nouvelles infections avait été recensé par les autorités, ce qui marquait une nette diminution par rapport à 2003, où l'on en dénombrait 9 000.

Ces données de surveillance de l'infection à VIH en France émanent des laboratoires de biologie médicale, qu'ils soient de ville ou hospitaliers, et incluent celles des tests rapides d'orientation diagnostique (TROD). Elles ne prennent pas en compte les quelque 3 millions de sérologies pratiquées annuellement à l'occasion d'un don du sang. Avec 5,6 millions de sérologies, l'activité de dépistage du VIH en 2017 était en augmentation de 12 % par rapport à 2010, sans pour autant que le nombre de sérologies positives confirmées évolue. Santé publique France suppose *« que l'augmentation du dépistage a sans doute peu bénéficié aux populations les plus exposées au VIH »*.

Une majorité de contaminations hétérosexuelles

La répartition des 6 400 découvertes de séropositivité VIH en 2017 – pour les deux tiers chez des hommes – fait apparaître une majorité (3 600 cas, soit 56 %) de contaminations lors de rapports hétérosexuels et 2 600 cas (41 %) lors de rapports sexuels entre hommes (HSH). Le reste est représenté par les 130 cas liés à l'usage de drogues injectables. Dans cette dernière population, le nombre de mises en évidence d'une séropositivité a diminué de moitié entre 2010 et 2017.

La proportion de sujets de moins de 25 ans est stable (12 %), soit 16 % chez les HSH et 9 % chez les hétérosexuels, tandis que la part des 50 ans et plus est en hausse, passant de 19 % en 2010 à 22 % en 2017.

Augmentation de cas chez les HSH nés à l'étranger

L'agence note que *« si le nombre de découvertes de séropositivité est globalement stable entre 2010 et 2017 chez les HSH des différences sont constatées selon le pays de naissance »*. S'il n'y a pas de variations chez les HSH nés en France, il existe une augmentation continue chez ceux nés à l'étranger : de 400 cas en 2011, soit 18 % des découvertes chez des HSH, leur nombre est passé à 675 cas, soit 26 % en 2017 (originaires pour 9 % d'entre eux du continent américain, pour 6 % d'Afrique subsaharienne, pour 5 % d'Europe et pour 6 % d'une autre région du monde). Santé publique France ne parvient pas à trancher sur les raisons d'une telle évolution chez les HSH nés à l'étranger. Elle pourrait être en lien avec un accroissement des nouvelles contaminations ou bien avec un recours plus important au dépistage.

Les trois quarts des découvertes de séropositivité chez des personnes hétérosexuelles concernent des individus nés à l'étranger. Leur nombre ne varie pas sur la période 2010-2017, mais chez les personnes hétérosexuelles nées en France, *« la diminution observée entre 2010 et 2014 ne s'est pas poursuivie ensuite. »*

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article présente le dernier bilan de l'épidémie due au virus VIH en France. Depuis quelques années, elle cesse de reculer pour devenir stable : depuis 2010, environ 6 400 patients découvrent leur séropositivité au VIH chaque année et parmi eux, un tiers environ présente un stade déjà avancé de l'infection. Ces chiffres semblent inquiétants alors que les activités de dépistage ont globalement augmenté, notamment grâce aux autotests de détection du virus disponibles depuis plus de quatre ans. Faciliter l'accès au dépistage du VIH, en particulier pour les populations qui en ont le plus besoin, en l'associant à une prise en charge adaptée des personnes infectées semble être une urgence si on veut faire reculer l'infection au VIH en France.

Enfin, l'enquête met en évidence le caractère encore tardif des découvertes de séropositivité : 30 % ont fait l'objet d'un diagnostic à un stade avancé de l'infection, que ce soit sur le plan clinique ou biologique, et ce, quel que soit le mode de contamination. De plus, la moitié (52 %) des personnes chez lesquelles l'infection par le VIH a été identifiée déclaraient ne jamais avoir été testées auparavant. Une proportion qui ne diminue pas ces dernières années.

« Très mauvais chiffres »

Au vu de ces données nationales – non détaillées par région ou département –, Santé publique France plaide pour *« lever les freins au dépistage du VIH pour atteindre les personnes jamais dépistées auparavant. Parallèlement, le dépistage répété doit être favorisé parmi les populations les plus exposées, en particulier les HSH »*. Ce serait le moyen, selon l'agence, d'atteindre le seuil de 95 % de personnes diagnostiquées parmi celles vivant avec le VIH.

Il faut faciliter l'accès au dépistage sans ordonnance

Pour l'épidémiologiste France Lert, présidente de l'association Vers Paris sans sida, ces résultats constituent de *« très mauvais chiffres. Nous disposons de nombreux outils médicaux de prévention : le préservatif, la prophylaxie pré-exposition (PrEP) sans restriction avec les antirétroviraux et le traitement systématique après exposition ou après la découverte d'une séropositivité. Nous devrions donc avoir des résultats positifs. Comme l'a affirmé l'un des chercheurs américains sur le VIH le plus prestigieux, Tony Fauci, nous n'aurons pas d'excuse. »*

France Lert rappelle que, pour lever les freins au dépistage, en particulier *« chez les hommes qui, dans tous les pays du monde, y ont peu recours »*, il faut en faciliter l'accès en favorisant par exemple le dépistage sans ordonnance, en s'appuyant sur les acteurs locaux et communautaires ou encore en allant à la rencontre des populations les plus exposées, comme le fait Vers Paris sans sida.

Elle prône la réorganisation de l'action de tous les acteurs, parfois pléthoriques, en l'adaptant à la réalité. *« Le plus mauvais test, c'est celui que l'on ne fait pas. Quand une personne se présente au moment où un centre de dépistage ferme, il ne faut pas la laisser partir sans lui remettre un autotest »*, insiste France Lert.

Paul Benkimoun, *Le Monde* daté du 28.03.2019

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

Le phénotype immunitaire d'un individu est sa capacité à répondre aux agents infectieux qu'il rencontre. Or, cette capacité de réponse n'est pas figée dans le temps mais évolue au cours de la vie : certaines maladies ne peuvent pas être contractées deux fois et la vaccination confère une protection contre des infections. Comment expliquer l'évolution du phénotype immunitaire au cours de la vie ?

Le début de la vaccination

Les **mécanismes de la réaction inflammatoire** et de la **mémoire du système immunitaire** ne sont connus que depuis le XX^{e} siècle, mais la réaction de l'organisme contre les pathogènes avait déjà été observée et étudiée de façon empirique. Depuis l'Antiquité, on a remarqué que les survivants d'une épidémie pouvaient être protégés contre l'épidémie suivante de la même maladie. Guérir d'une maladie permet donc d'être protégé contre celle-ci des années durant. Cependant, cette constatation empirique est loin d'être systématique : ainsi, on peut à nouveau être atteint par le rhume, alors qu'on en avait guéri l'année précédente. Pourquoi existe-t-il une mémoire immunitaire contre certaines maladies mais pas contre d'autres ? La lutte contre la variole permit de répondre à cette question. Avant le XVII^{e} siècle, les médecins pratiquaient la **variolisation**, qui consistait à inoculer à des patients sains de vieilles pustules desséchées de varioleux. Cette pratique présentait un risque mais permettait une bonne protection contre une épidémie de cette maladie mortelle. Un médecin anglais, **Edward Jenner**, a constaté que les paysans au contact des vaches contractaient une maladie bovine proche de la variole : la vaccine, qui les protégeait contre les épidémies de variole. En 1796, Jenner eut l'idée (selon un protocole que l'éthique médicale réprouverait aujourd'hui) d'injecter à un jeune garçon des extraits de pustules, prélevés sur une jeune vachère atteinte par la vaccine. Il inocula ensuite la variole au jeune garçon, qui ne contracta pas la maladie. Cette découverte à l'orée du XIX^{e} siècle ouvrit la porte à ce qui fut appelée la **vaccination**. Les travaux de **Louis Pasteur** sur le choléra des poules et sur la rage ont confirmé la protection que l'injection d'un agent ressemblant à l'agent pathogène confère à l'organisme contre ce même agent pathogène.

Le principe de la vaccination

La première rencontre du système immunitaire avec un **agent pathogène** déclenche une **réponse immunitaire dite « primaire »** qui consiste en la mise en place de **cellules effectrices** (plasmocytes sécréteurs d'anticorps, lymphocytes T auxiliaires, lymphocytes T cytotoxiques) spécifiques de cet agent. Lors d'un contact ultérieur avec le même agent infectieux, la **réponse immunitaire dite « secondaire »** est plus rapide et quantitativement plus importante. En effet, la réaction immunitaire primaire s'accompagne de la formation de cellules immunitaires mémoires à longue durée de vie : il s'agit des **lymphocytes T et B mémoires et des plasmocytes mémoires.**. Les études ont montré que certaines cellules immunitaires, dont certains lymphocytes B et T, peuvent vivre très longtemps, au moins une dizaine d'années, dans l'organisme. Ainsi, lors d'un contact ultérieur avec l'agent infectieux, les LT et LB mémoires réagissent beaucoup plus vite à l'agent infectieux en proliférant et en se différenciant beaucoup plus rapidement que les LT et LB naïfs, qui n'ont jamais été activés par l'agent infectieux. L'existence de cette réaction secondaire intense et rapide nécessite que les LT et LB mémoires réagissent à des antigènes proches de ceux les ayant activés la première fois.

Le principe du **vaccin** utilise cette **mémoire immunitaire** : le patient

ZOOM SUR...

LA DISPARITION DES MALADIES

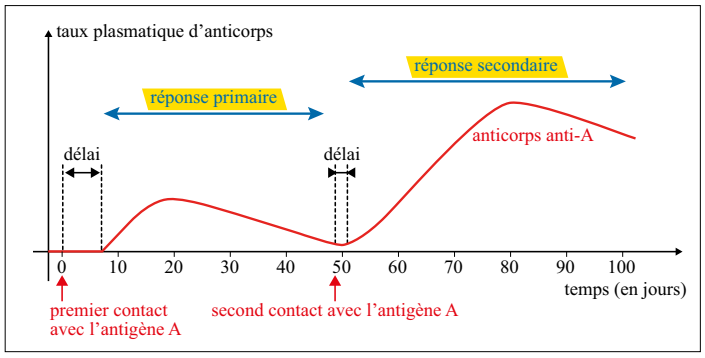
De nouvelles maladies apparaissent (sida, etc.), certaines disparaissent, avec ou sans vaccination. La peste, à l'origine d'épidémies meurtrières au Moyen Âge en Europe, a disparu au XVIII^{e} siècle car les individus présentant une meilleure réponse immunitaire contre la peste ont été sélectionnés d'un point de vue évolutif. En octobre 1977, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré totalement éradiquée une maladie virale très contagieuse : la variole ou « petite vérole ». Cette éradication est le résultat de campagnes de vaccination massive mises en œuvre à partir des années 1960 sur tous les continents.

Actuellement, seuls quelques laboratoires au monde sont autorisés à conserver des échantillons du virus de la variole. Cette conservation fait débat au sein de la communauté scientifique : quel est l'intérêt de conserver ce virus particulièrement dangereux pour les populations actuelles qui n'y ont jamais été exposées ?

LE VACCIN DE PASTEUR CONTRE LA RAGE

En 1885, un enfant, Joseph Meister, âgé de 9 ans, fut mordu par un chien enragé : il consulta rapidement Louis Pasteur, bien avant que sa rage soit déclarée. Pendant une dizaine de jours, Pasteur lui inocula une suspension de moelle osseuse de lapin mort de la rage et Joseph Meister ne développa pas cette maladie mortelle. Les injections ont permis à son système immunitaire de développer une réponse immunitaire primaire avant que se développe le virus. Puis, la réponse immunitaire secondaire a permis à l'enfant de lutter contre le virus contracté lors de la morsure. Par la suite, Pasteur fit même une injection de l'agent responsable de la rage à l'enfant pour prouver la protection conférée par la vaccination.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Réponses primaire et secondaire du système immunitaire

est exposé à un pathogène modifié et non dangereux (pathogène tué, inactivé ou morceau de pathogène) mais immunogène, c'est-à-dire entraînant une réaction immunitaire suffisante pour former des LB et des LT mémoires.

Il est souvent nécessaire d'effectuer des **rappels de vaccination** pour entretenir cette mémoire immunitaire. Ainsi, par la vaccination, le patient qui n'a pas développé la maladie causée par l'agent infectieux possède un **phénotype immunitaire** qui lui permet lors d'un contact ultérieur avec l'agent infectieux de déclencher une réponse immunitaire secondaire, suffisament rapide et intense, pour lui éviter de tomber malade.

L'adjuvant, déclencheur de la réaction innée, indispensable à la réaction adaptative

De nombreux vaccins contiennent, en plus de l'agent vaccinant, un **adjuvant**. L'adjuvant est une substance (comme les sels d'aluminium ou le squalène) qui déclenche une réaction immunitaire innée, c'est-à-dire une **réaction inflammatoire**.

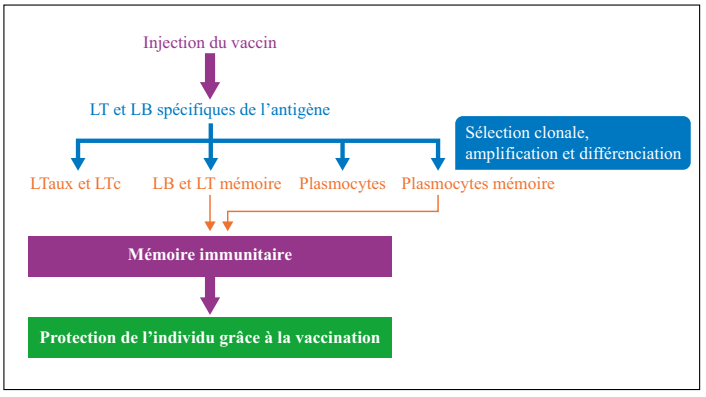
Cette réaction inflammatoire, due à la présence de l'adjuvant, stimule l'activation des cellules dendritiques, qui phagocytent l'agent vaccinant et le dégradent en antigène. Ces cellules dendritiques migrent vers les ganglions lymphatiques et présentent l'antigène exposé au sein de leur CMH aux lymphocytes T CD4. Ces LT CD4 activés par l'antigène deviennent des LT auxiliaires qui stimulent la différenciation des LB en plasmocytes sécréteurs d'anticorps et la différenciation des LT CD8 en LT cytotoxiques.

Ainsi l'adjuvant du vaccin déclenche la réaction innée indispensable à l'installation de la réaction immunitaire adaptative, dont l'intensité est accrue. Le rôle des adjuvants présents dans les vaccins souligne l'importance de la **coopération** entre l'immunité innée et l'immunité acquise.

La vaccination et la santé publique

La vaccination a pour objectif une **protection individuelle**, mais aussi une **protection collective**, et elle peut permettre une éradication du pathogène, à condition que l'homme soit le seul hôte de cet agent pathogène. C'est le cas en particulier de la variole, éradiquée sur tous les continents depuis 1979.

La **couverture vaccinale d'une population** représente le pourcentage de la population vaccinée. On considère qu'il faut environ une couverture vaccinale de 95 % pour qu'une maladie soit absente de la population. La vaccination constitue donc un véritable enjeu de santé publique.



Vaccin et mémoire immunitaire

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Rougeole, l'éternel retour** p. 81-82
(Paul Benkimoun et Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 27.03.2019)

ZOOM SUR...

L'IMMUNOLOGIE

1796 : Jenner pratique les premières vaccinations contre la variole avec la vaccine bovine.
1878 : mise au point par Pasteur de la vaccination avec des agents pathogènes.
1882 : découverte de la phagocytose par Metchnikoff.
1890 : isolement des anticorps par von Behring et Kitasato.
1980 : identification des gènes codants pour les LCR des LT et BCR des LB.
1983 : identification du VIH par l'équipe de Montagnier.
2011 : prix Nobel de Médecine décerné à Hoffmann, Beutler et Steinmann pour leurs travaux sur l'immunité innée (récepteurs Toll et TLR, cellules dendritiques).

REPÈRE

LES VACCINATIONS

• Diphtérie, tétanos, coqueluche, poliomyélite (vaccination obligatoire) : 3 injections à 2, 3 et 4 mois, puis 4 rappels avant 18 ans. Rappels tous les dix ans chez l'adulte.
• Rougeole, oreillons, rubéole : 1 injection à 12 mois, puis une 2e entre 13 et 24 mois.
• Hépatite B : 3 injections à 2, 4 et 16-18 mois.
• Tuberculose : vaccination non obligatoire pour l'entrée en collectivité depuis 2007 mais recommandée pour les enfants à risque élevé de tuberculose (Île-de-France, Guyane, Mayotte, antécédents familiaux de tuberculose, etc.) : injection dès la naissance et injections supplémentaires entre 3 et 11 mois, et après 12 mois si nécessaire.
• Grippe saisonnière : vaccination recommandée à partir de 65 ans, aux femmes enceintes, aux personnes avec diverses pathologies (dont l'obésité) : une injection tous les ans.
• De nombreuses autres vaccinations existent (coqueluche, varicelle, hépatite A, papillomavirus humain, pneumocoque, méningocoque, etc.) La vaccination est à adapter à chaque individu en fonction de son lieu de vie, de son mode de vie et de son état de santé.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.1 : Diagnostic immunitaire chez un enfant

L'intitulé complet du sujet

Entre 3 et 18 mois, un enfant a été admis de très nombreuses fois à l'hôpital pour diverses infections bactériennes graves. Il a reçu tous les vaccins (tétanos, diphtérie, rougeole, etc.) prévus à l'âge de 2, 3 et 4 mois. Des analyses ont été réalisées et ont permis de déterminer qu'il était atteint d'une maladie héréditaire (la maladie de Bruton). Exploitez les informations saisies dans le document proposé afin d'expliquer pourquoi l'organisme de cet enfant est incapable de lutter contre les infections bactériennes.

Le document

Résultats des examens de laboratoire ayant permis le diagnostic

Vaccins reçus	**Dosage des anticorps** spécifiques en réponse aux vaccinations**	
Anatoxine* tétanique	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
Anatoxine diphtérique	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
Virus de la rougeole	Pas d'anticorps spécifiques détectés	
	Dosage des immunoglobulines du sérum chez le patient**	**Valeurs normales pour l'âge de 18 mois**
Immunoglobulines G	0,17 $g.L^{-1}$	5,5 à 10,0 $g.L^{-1}$
Immunoglobulines A	Non détectées	0,3 à 0,8 $g.L^{-1}$
	Sous-population lymphocytaire du sang	**Valeurs normales pour l'âge de 18 mois**
Lymphocytes totaux	3,05.10^7 L^{-1}	2,5.10^7 $g.L^{-1}$ à 5.10^7 $g.L^{-1}$
Lymphocytes B	0,03.10^7 L^{-1}	0,1.10^7 $g.L^{-1}$ à 0,4.10^7 $g.L^{-1}$
Lymphocytes T	3,02.10^7 L^{-1}	1,5.10^7 $g.L^{-1}$ à 3,0.10^7 $g.L^{-1}$

D'après H. Chapel, M. Haeney, S. Misbah, N. Snowden, *Immunologie clinique*

*Les anatoxines sont des protéines bactériennes.

**Anticorps et immunoglobulines sont des synonymes ; ces molécules sont produites par les lymphocytes B.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Se contenter de saisir les données du document sans les mettre en relation et sans expliquer l'origine des infections bactériennes répétées.

Proposition de corrigé

L'enfant a reçu tous les vaccins prévus à l'âge préconisé, mais les tests réalisés montrent l'absence d'anticorps spécifiques dirigés soit contre l'anatoxine diphtérique (vaccination contre la diphtérie), soit contre l'anatoxine tétanique (vaccination contre le tétanos), soit contre le virus de la rougeole (vaccination contre la rougeole). La vaccination n'a pas entraîné l'apparition d'anticorps dirigés spécifiquement contre les antigènes contenus dans les vaccins comme cela aurait dû être le cas. La vaccination n'a donc pas été effective et elle n'a pas pu conférer de protection.

Le taux d'immunoglobulines G de l'enfant est très faible (0,17 $g.L^{-1}$ alors que le taux normal est de 5,5 à 10,0 $g.L^{-1}$) et les immunoglobulines A ne sont pas détectées (leur taux normal est de 0,3 à 0,8 $g.L^{-1}$). Cet enfant produit donc très peu d'immunoglobulines, ce qui explique ses graves infections microbiennes répétées et l'inefficacité de la vaccination.

Enfin, l'étude des populations lymphocytaires de l'enfant montre que le nombre de lymphocytes totaux est normal chez cet enfant (3,05.10^7 L^{-1} pour un taux normal de 2,5.10^7 L^{-1} à 5.10^7 L^{-1}). Mais si le taux de LT est dans la norme (3,02.10^7.L^{-1} pour un taux normal de 1,5.10^7 L^{-1} à 3,0.10^7 L^{-1}), le taux de LB de 0,03.10^7.L^{-1} est très faible, représentant environ un tiers de la valeur minimale.

Ainsi cet enfant présente une anomalie importante du nombre de LB. Son très faible taux de LB ne lui permet pas de produire assez d'anticorps pour lutter efficacement contre des infections bactériennes. De plus, sa carence en LB rend inefficace toute vaccination : il est donc susceptible de contracter des maladies que les autres enfants vaccinés ne déclarent pas. Cette très faible quantité de LB dans son organisme a une origine héréditaire. ●

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents

– Mise en évidence de la mémoire immunitaire.
– Justification du calendrier de vaccination.
– Étude de mise au point de vaccins (VIH, trypanosome, paludisme, vaccin anti-tumeur, etc.).
– Étude du rôle des adjuvants.

ZOOM SUR…

VACCIN ANTI-VIH : DES PISTES, MAIS UN VACCIN EFFICACE TOUJOURS ATTENDU

L'isolement du VIH en 1983 avait ouvert la perspective de l'obtention rapide d'un vaccin. Mais l'extrême variabilité du VIH a jusqu'à maintenant rendu difficile la mise au point d'un vaccin. Les traitements antirétroviraux (comme le Truvada) ont récemment montré qu'ils réduisaient le risque de transmission du VIH par voie sexuelle, mais à la condition d'être pris quotidiennement. En 2009, des essais cliniques d'un vaccin anti-VIH ont montré une efficacité partielle (31 %) mais intéressante. Les chercheurs progressent actuellement dans l'explication de ces résultats et espèrent pouvoir améliorer l'efficacité de ce vaccin. Actuellement, aux États-Unis, l'efficacité d'un autre vaccin ayant montré son innocuité est en cours d'étude chez l'homme.

CANCERS ET IMMUNOTHÉRAPIE

L'immunothérapie passive consiste à administrer au malade des anticorps artificiels dits « monoclonaux », ayant une cible moléculaire précise à la surface des cellules cancéreuses dans l'objectif de détruire ces dernières. Des anticorps contre des facteurs qui interviennent dans la multiplication des cellules sont également utilisés pour bloquer la prolifération cellulaire.

L'immunothérapie active vise à mobiliser ou à renforcer les ressources du système immunitaire pour accroître l'élimination des cellules cancéreuses. Elle consiste à stimuler l'activité globale du système immunitaire du malade en utilisant des cytokines (interféron α par exemple). Des cellules tumorales du patient peuvent être cultivées pour les rendre plus immunogènes avant de les réinjecter. Enfin les cellules immunitaires peuvent être modifiées pour les rendre plus efficaces contre les cellules tumorales.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Rougeole, l'éternel retour

Cette maladie infectieuse, qui tuait jusqu'à 2,5 millions de personnes par an avant la diffusion de la vaccination, ne cesse de ressurgir. Les objectifs de l'Organisation mondiale de la santé pour 2020 ne seront pas tenus, pour des raisons parfois contradictoires : baisse de vigilance ou refus de vaccination ici, accès incomplet à celle-ci ailleurs.

Elle aurait dû disparaître avec la disponibilité d'un vaccin qui a fait ses preuves, mis sur le marché il y a plus de cinquante ans, et peu coûteux. Après une forte régression de 2000 à 2016, la rougeole flambe de nouveau, avec des foyers épidémiques sur tous les continents. En Europe, l'Ukraine est au premier rang, mais la maladie sévit aussi dans des pays comme la France et l'Italie. En 2012, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) avait fixé les objectifs d'avoir éliminé la rougeole en 2015 dans quatre des six régions dans lesquelles elle répartit ses 194 Etats membres (Afrique, Amériques, Asie du Sud-Est, Europe, Méditerranée orientale, Pacifique occidental) et en 2020 pour cinq d'entre eux. Les délais ne pourront être tenus.

« Comparée aux maladies cardiovasculaires ou au cancer, la rougeole peut apparaître comme un problème de santé publique peu important, mais il s'agit d'une maladie infectieuse extrêmement contagieuse, face à laquelle nous disposons d'un vaccin efficace et pour laquelle l'Organisation mondiale de la santé a affiché un objectif d'élimination progressive. Or, elle connaît une recrudescence, y compris en France. Cela ne va pas », déplore la professeure Astrid Vabret, chef du service de virologie du CHU de Caen et directrice du Centre national de référence de la rougeole, des oreillons et de la rubéole.

L'année 2018 a été marquée par un sérieux rebond qui alarme l'OMS et l'Unicef. Entre 2017 et 2018, le nombre de cas a pratiquement doublé sur la planète, un constat d'autant plus inquiétant qu'il n'est pas encore définitif, les pays ayant jusqu'à fin avril pour déclarer leurs données. Or, comme le rappelle Christian Lindmeier, porte-parole de l'OMS, la rougeole peut être une maladie très grave, voire mortelle. De plus, observe-t-il, *« c'est une infection tellement contagieuse qu'elle constitue une sorte de baromètre pour d'autres maladies. Si un enfant n'a pas été vacciné contre la rougeole, il est très probable qu'il n'ait pas reçu d'autres vaccins cruciaux, ce qui peut laisser craindre d'autres épidémies dans les temps à venir »*.

En 2017, environ 170 000 cas de rougeole avaient été recensés par l'OMS. Pour 2018, plus de 307 000 cas ont déjà été déclarés, par 183 pays. Les données de 11 nations sont encore attendues. Le nombre le plus élevé de cas est enregistré en Europe (plus de 82 000 en 2018), devant l'Asie du Sud-Est (plus de 70 000).

Ces données sont à interpréter avec précaution, les cas étant largement sous-déclarés, notamment dans les pays avec des systèmes de santé et de surveillance épidémiologique peu performants. Inversement, tous les cas notifiés à l'OMS n'ont pas été confirmés par le contexte épidémiologique et encore moins par des examens de laboratoire, et certaines éruptions dues à d'autres causes peuvent avoir été attribuées à tort à la rougeole.

Existence de cas autochtones

Qu'en sera-t-il en 2019 ? Pour l'heure, peu de chiffres sont disponibles à l'international. Mais des épidémies sont en cours dans de nombreux pays : Brésil, République démocratique du Congo, Géorgie, Israël, Kazakhstan, Birmanie, Philippines, Soudan, Thaïlande, Etats-Unis, Venezuela, Yémen, entre autres, énumère le porte-parole de l'OMS. Selon les centres de contrôle et de prévention des maladies (CDC), six foyers épidémiques ont été enregistrés aux Etats-Unis en 2019 : dans l'Etat de New York, la ville de New York, et les Etats de Washington, du Texas, de l'Illinois et de la Californie. A mi-mars, un total de 268 cas étaient notifiés alors qu'il en avait été dénombré 372 pour l'année 2018. Les autorités évoquaient le plus souvent des cas importés par des voyageurs mais ils ont bien identifié à présent l'existence de cas autochtones.

Cette flambée mondiale récente survient après une période de quinze ans où la rougeole avait reculé sur tous les continents, grâce aux efforts de vaccination. Entre 2000 et 2016, le nombre de cas était passé d'environ 853 000 à 132 000 à l'échelle planétaire, avec des données particulièrement impressionnantes sur certains continents. Ainsi, les cas avaient chuté de 520 000 à 36 000 en Afrique, de 177 000 à 57 000 dans le Pacifique occidental, de 78 000 à 27 000 en Asie du Sud-Est, de 37 000 à 4 100 en Europe.

Durant cette période 2000-2016, il est estimé que le vaccin antirougeoleux (souvent associé à ceux contre la rubéole et les oreillons) a permis de prévenir la survenue de plus de 20 millions de décès. En effet, avant la généralisation de ce vaccin, disponible depuis 1963, la rougeole faisait certaines années plus de 2,5 millions de morts, surtout des enfants. C'est dans les pays pauvres que ce vaccin a sauvé le plus de vies. La létalité de la rougeole est en effet bien plus élevée dans les pays en voie de développement (de 3 % à 6 %) que dans les pays riches (de 1 à 2 pour 1 000 aux Etats-Unis), selon un document de l'Institut de veille sanitaire (ancêtre de Santé publique France) datant de 2004. En France, avant l'introduction de la vaccination, le nombre de décès se comptait en dizaines par an. A la fin des années 1990, il était de l'ordre de cinq par an, estime ce même document.

En 2016, pour l'ensemble de la planète, cette maladie était passée pour la première fois sous la barre des 100 000 décès, mais elle est repartie à la hausse en 2017, avec 110 000 victimes. Les données pour 2018 sont encore attendues.

A l'échelle mondiale, le taux de couverture vaccinale est encore loin des 95 % recommandés, ce alors que le vaccin est peu onéreux : il ne coûte qu'un dollar quand il n'est pas remboursé à 100 % comme en France. *« Fin 2016, 85 % des enfants avaient reçu une dose de vaccin antirougeoleux à leur deuxième anniversaire, 164 pays avaient inclus une seconde dose dans leur programme de vaccination systématique et 64 % des enfants avaient reçu deux doses de vaccin antirougeoleux conformément au calendrier de vaccination national »*, indique l'OMS.

Jusqu'ici, l'organisation n'a jamais affiché un objectif d'éradication de la maladie à l'échelle mondiale, souligne cependant Christian Lindmeier, un de ses porte-parole. *« Seule la région Amériques y est parvenue, en éliminant la circulation endémique du virus rougeoleux. Mais ce n'est plus le cas, puisque la maladie, qui a été réintroduite, circule au Venezuela depuis plus de douze mois maintenant »*, précise-t-il. Les objectifs concernant la rougeole et la rubéole doivent être réexaminés par l'Assemblée mondiale de la santé, en 2020.

Selon le porte-parole, l'élimination de la rougeole est confrontée à plusieurs défis. Il y a d'abord des lacunes en matière de financement et d'engagement. Ensuite, la nature hautement infectieuse du virus exige une immunité élevée de la population (couverture vaccinale d'environ 95 % avec deux doses de vaccin). Le troisième défi, selon Christian Lindmeier, réside dans la facilité de propagation et de réintroduction du virus dans des pays où il avait été éliminé, comme au Venezuela.

La défiance plus ou moins généralisée envers les vaccins a aussi contribué à faire chuter la couverture vaccinale, du moins dans certains pays, dont la France. Dans le cas particulier du vaccin ROR (rougeole, oreillons, rubéole), les doutes sont nés en 1998 avec la publication dans la revue *The Lancet* d'une étude d'Andrew Wakefield, suggérant un lien entre cette vaccination et des troubles autistiques. Depuis, il a été montré que les travaux de ce chirurgien britannique étaient frauduleux et son article a été rétracté. De plus, d'autres études (dont une récente) n'ont jamais retrouvé ce lien, mais les rumeurs continuent à être entretenues par le mouvement « antivax », où Andrew Wakefield est toujours actif.

L'Europe frappée de plein fouet

Pour l'heure, la région Europe, telle que définie par l'OMS avec 53 Etats membres, fait partie de celles où l'augmentation des cas de rougeole a été la plus importante ces dernières années. La maladie y a entraîné 72 décès d'enfants et d'adultes en 2018. Selon les informations recueillies par l'institution internationale, 82 596 personnes dans 47 Etats membres ont contracté la rougeole au cours de l'année 2018. Près des deux tiers (61 %) des cas ont conduit à une hospitalisation, et encore cela ne concerne que les pays ayant fourni des données sur les séjours hospitaliers…

« Le nombre total de personnes infectées par le virus en 2018 était aussi le plus élevé de cette décennie : trois fois le nombre total signalé en 2017 et 15 fois le nombre

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

exceptionnellement peu élevé de personnes infectées en 2016 », précise l'OMS Europe. Paradoxalement, ajoute l'institution, la recrudescence des cas en 2018 fait suite à une année au cours de laquelle la région européenne a atteint le taux de couverture vaccinale estimé le plus élevé jamais enregistré pour la deuxième dose de vaccin contre la rougeole (90 % en 2017).

Ce paradoxe est en partie expliqué par le cas de l'Ukraine, qui occupe le peu enviable premier rang des pays touchés en Europe. Plus de 53 000 cas y ont été confirmés en 2018 (sur les 83 000 de la région Europe de l'OMS), dont 16 mortels, plus que toutes les années précédentes depuis l'indépendance du pays en 1991. Et 2019 ne s'annonce pas plus calme : plus de 13 700 cas ont déjà été confirmés pour la période entre le 1er janvier et le 7 mars. Sur sa page Facebook, la ministre de la santé Ulana Suprun cite le cas de la région la plus affectée, celle de Lviv dans l'ouest du pays, dont la capitale homonyme est située à 80 km de la frontière polonaise.

Cette zone a enregistré 11 000 cas de rougeole en 2018, dont 7 000 sont survenus chez des personnes non vaccinées et le reste chez des individus n'ayant eu que la première des deux doses de vaccin. Le ministère de la santé ukrainien avance comme explication une campagne antivaccination très active dans le pays. La couverture vaccinale, qui avait grimpé en 2017 à 93 % – soit très près du niveau recommandé par l'OMS –, est redescendue à 84 % pour la première dose du vaccin en 2018, indiquait la ministre de la santé. Une campagne de vaccination de masse pour les enfants et les adultes a été lancée. En 2018, le nombre d'enfants non vaccinés a été diminué de moitié : de 790 000 au début de l'année à 390 000 en novembre, précise le ministère de la santé. Et la vaccination antirougeoleuse est devenue gratuite pour les adultes en juin 2018.

En France, la rougeole fait partie des 33 pathologies – dont 31 sont infectieuses – à déclaration obligatoire : les médecins sont tenus de notifier les cas à leur agence régionale de santé. Pour la rougeole, cette procédure a été instaurée en 1945, levée en 1986 et réintroduite en 2005.

Selon le dernier point de situation, daté du 20 mars, établi par Santé publique France, qui tient un décompte hebdomadaire, 405 cas ont été déclarés depuis le 1er janvier. Il y en avait 1 156 pour la même période en 2018, année où, au total, 2 913 cas ont été confirmés. *« L'exhaustivité est d'environ 50 %, ce qui veut dire que la moitié des cas ne sont pas déclarés »*, nous indiquait récemment Denise Antona, médecin épidémiologiste à Santé publique France.

Rappelons que notre pays a connu trois vagues épidémiques successives en 2008, 2010 et surtout 2011. Le nombre de cas notifié était de plus de 5 000 en 2010, dont 8 accompagnés de complications neurologiques (encéphalites/myélites), 287 donnant lieu à des pneumopathies graves, et deux décès. En 2011, ce nombre avait dépassé les 15 000 cas, dont 16 avec complication neurologique, 649 avec une pneumopathie grave et 6 décès.

Beaucoup ont oublié la potentielle gravité de la rougeole, car le vaccin a fait une grosse partie du travail pour la prévenir. S'il fait partie des virus les plus contagieux, le morbillivirus responsable de cette infection n'est pas un tueur comme le sont le virus Ebola ou celui de la rage. *« Le problème avec le virus de la rougeole n'est pas tant le virus lui-même que la personne qu'il rencontre et à quel moment*, souligne Astrid Vabret. *Dans les années 1960, la France comptait de 600 000 à 700 000 cas par an, avec peu d'hospitalisations mais l'existence de complications tardives, principalement des encéphalites. Actuellement, la population est plus sensible aux virus, car plus âgée et plus immunodéprimée. »* La virologue précise ainsi qu'il y a une augmentation du nombre de patients traités par immunosuppresseurs, chimiothérapies ou biothérapies. Or ces médicaments prescrits pour soigner des cancers ou des maladies auto-immunes diminuent les défenses immunitaires.

Un problème d'identification

Le vaccin a été introduit dans le calendrier vaccinal en France en 1983. Depuis 1994-1995, il est administré en deux injections, pour « rattraper » la plupart des personnes ne répondant pas à la première dose. Mais le taux de vaccination complète est plus faible que celui de la première injection seule. Dans notre pays, ces taux sont actuellement de 90 % pour la première dose et de 80 % pour la seconde. De nouvelles données sont attendues fin avril, alors que le vaccin antirougeoleux est, comme d'autres, devenu obligatoire dans notre pays depuis le 1er janvier 2018. Y aura-t-il déjà une augmentation de la couverture vaccinale ? Cette évolution donnerait aux autorités sanitaires un argument pour légitimer sa politique d'obligation.

« 85 % des cas de rougeole surviennent chez des personnes non vaccinées, 12 % chez des individus ayant eu une vaccination incomplète, le reste étant des patients chez lesquels le vaccin a été inefficace à les protéger », énumère le docteur Pierre Bakhache, pédiatre libéral et expert pour la plate-forme d'informations sur la vaccination Infovac. Il souligne que, dans sa région, les Hauts-de-France, la couverture vaccinale pour la rougeole est très bonne et supérieure à celle observée dans le sud du pays : *« Il y a une importante population défavorisée, qui a confiance et s'en remet à l'avis du médecin quant à la vaccination. »*

Les trois décès recensés en France en 2018 et celui annoncé le 13 mars ont tous frappé de jeunes adultes qui présentaient une situation d'immunodépression et des contre-indications à la vaccination. *« Ils n'ont pas eu le choix. Il est d'autant plus choquant de voir des personnes ayant le choix ne pas faire vacciner leur enfant »*, s'insurge Astrid Vabret. Une illustration du fait que la vaccination est un acte de prévention pour soi mais aussi altruiste.

Outre les perceptions erronées sur la gravité de la rougeole, se pose le problème de son identification. Les médecins ayant commencé à pratiquer depuis les années 1990 ont peu été confrontés à la maladie et n'y pensent pas forcément. Faire le diagnostic est pourtant d'autant plus important qu'il faut prendre des mesures pour l'entourage du malade, protéger les personnes à risque notamment.

Généraliste enseignant et expert en vaccinologie, le professeur Serge Gilberg fait partie de ceux qui ont vu des cas de cette fièvre éruptive avant que le vaccin soit introduit dans le calendrier vaccinal. *« La rougeole est bien sûr présente dans l'enseignement des étudiants en médecine, mais on sait qu'un médecin mémorise beaucoup mieux les pathologies auxquelles il a été confronté. Les recommandations sur la gestion de la maladie et la prophylaxie pour l'entourage d'un cas sont peu connues »*, remarque Serge Gilberg. De plus, rappelle-t-il, la maladie peut être trompeuse sur le plan clinique : un gros rhume pendant cinq à six jours, suivi d'une éruption qui peut faire évoquer plusieurs diagnostics. La recrudescence de foyers épidémiques a toutefois sensibilisé les jeunes générations de médecins.

Le pédiatre Pierre Bakhache a observé deux ou trois cas au cours des cinq dernières années. Dans son cabinet, mais pas seulement. Il raconte avoir été confronté à un diagnostic il y a trois ans lors de vacances en Haute-Savoie : *« J'avais conduit ma fille pour une consultation chez un médecin généraliste. Dans la salle d'attente se trouvaient une jeune fille de 16 ans et sa mère. J'ai appris que la jeune fille avait eu un gros rhume et avait pris des antibiotiques. Lorsque l'éruption est apparue, le médecin qui l'a examinée a estimé qu'il s'agissait d'une réaction d'allergie au médicament. J'ai prié la mère d'éloigner sa fille des bébés qui étaient présents dans la salle d'attente et lui ai demandé si son enfant avait été vaccinée contre la rougeole. Elle m'a rétorqué : "Non ! Je protège ma fille et cela ne vous regarde pas." »* Erreur du médecin et réticence du parent à la vaccination se conjuguent.

« Il faut que les médecins diffusent l'information sur la rougeole et fassent un geste qui prend deux secondes : vérifier systématiquement le carnet de santé des enfants afin de s'assurer qu'ils ont bien été vaccinés avec deux injections. Toutes les occasions sont bonnes pour mettre à jour les vaccins », insiste Pierre Bakhache.

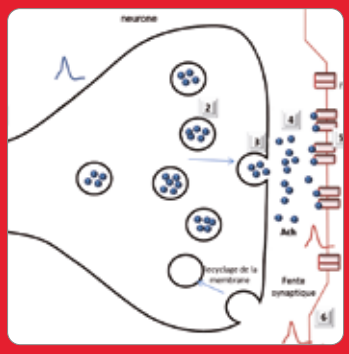
Paul Benkimoun et Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 27.03.2019

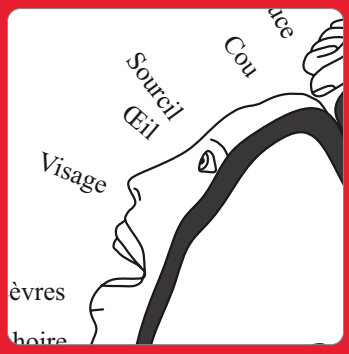
POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article dresse un bilan inquiétant de la recrudescence de la rougeole à travers le monde. Un vaccin efficace contre la rougeole existe depuis plus de cinquante ans et on estime qu'il a permis de sauver 20 millions de vies entre 2000 et 2016, notamment dans les pays les plus pauvres. La rougeole passe pour être une maladie infantile sans gravité mais elle est extrêmement contagieuse et peut s'accompagner de complications parfois mortelles. Ces dernières années, la remise en cause sans aucun fondement scientifique de la vaccination a entraîné l'apparition de véritables épidémies de rougeole dans de nombreux pays. La protection des populations contre la rougeole passe par une augmentation de la couverture vaccinale et une vigilance renforcée à l'égard de cette maladie infectieuse.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

NEURONE ET FIBRE MUSCULAIRE : LA COMMUNICATION NERVEUSE





© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

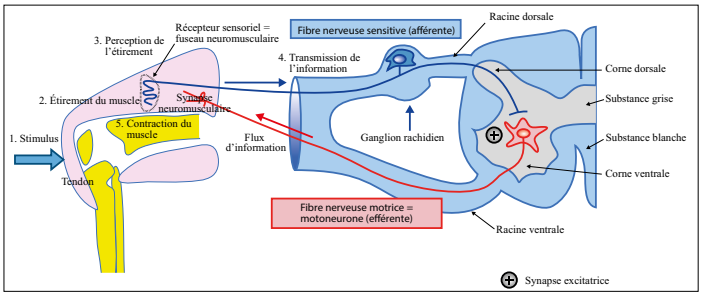
Rester debout, ne pas perdre l'équilibre, maintenir notre posture malgré la pesanteur nécessitent un fonctionnement permanent et adapté de nos muscles extenseurs et fléchisseurs. Les muscles impliqués dans la posture comme dans le mouvement sont des muscles striés squelettiques, attachés au squelette par des tendons. Le mouvement des muscles se répercute sur le mouvement du squelette au niveau des articulations. Dans le cas de la posture, ces mouvements ne sont pas commandés consciemment, ce sont des réflexes musculaires. Comment les réflexes myotatiques commandent-ils la contraction de certains muscles ?

Le réflexe myotatique : un outil diagnostique

Afin de vérifier l'**état de tension** qui s'exerce sur les muscles pour s'opposer à l'action de la gravité sur le corps humain, c'est-à-dire pour tester le **tonus musculaire**, le médecin peut frapper avec un marteau approprié soit au niveau du tendon d'Achille (au-dessus du talon), soit au niveau de la rotule (sous le genou) et observer le résultat. Le réflexe myotatique est une **réaction rapide et involontaire du corps**. En réaction à son propre étirement, le muscle se contracte automatiquement.

Diverses expériences historiques ont permis de comprendre le mécanisme du **réflexe myotatique**. Chez un chat dont la moelle épinière est sectionnée en-dessous de l'encéphale, le pincement de la plante du pied déclenche un réflexe de retrait, impliquant une contraction du muscle. Mais le chat ne peut pas commander volontairement le mouvement de sa patte. Ainsi le réflexe myotatique ne fait pas intervenir le cerveau. Des expériences de sections des nerfs reliant les muscles à la **moelle épinière** et de stimulations après sections montrent que la **moelle épinière** est le **centre nerveux** des réflexes myotatiques.

Ainsi, en tapant avec le marteau sur le tendon, le médecin étire artificiellement ce dernier : ce stimulus va être perçu par des récepteurs à l'étirement : les fuseaux neuromusculaires. Le message nerveux remonte *via* un **neurone sensoriel** du **nerf rachidien** qui rejoint, au niveau de sa racine dorsale (ou postérieure), la moelle épinière. Les corps cellulaires des neurones sensoriels sont situés dans les **ganglions rachidiens** et leurs extrémités sont en contact, au niveau de la corne ventrale de la substance grise de la moelle épinière, avec le corps cellulaire d'un **motoneurone ou neurone moteur**.



Circuit nerveux du reflexe myotatique

NOTIONS CLÉS

NEUROMÉDIATEUR, NEUROTRANSMETTEUR

Molécule libérée par un neurone au niveau d'une synapse et capable de transmettre le message nerveux à la cellule post-synaptique.

SYNAPSE NEUROMUSCULAIRE

Également appelée « jonction neuromusculaire » ou « plaque motrice », la synapse neuromusculaire est la zone de contact entre la terminaison synaptique d'un motoneurone et une cellule musculaire. L'arrivée d'un message nerveux à l'extrémité du motoneurone peut déclencher la contraction de la cellule musculaire.

MESSAGE NERVEUX

Succession de potentiels d'action qui se propagent le long des neurones. L'intensité du message nerveux est codée en fréquence de potentiels d'action.

SYNAPSE

Zone de contact entre un neurone et une autre cellule excitable (nerveuse ou musculaire) au niveau de laquelle le message nerveux est transmis par l'intermédiaire des neuromédiateurs.

NEURONE

Ou « cellule nerveuse », il est constitué d'un corps cellulaire contenant le noyau et de prolongements, l'axone et les dendrites. Les dendrites sont les prolongements qui reçoivent des messages nerveux tandis que l'axone conduit le message nerveux vers les terminaisons synaptiques.

Un neurone est une cellule excitable (capable de répondre à un stimulus) et constitue l'unité de structure et de fonction du système nerveux.

POTENTIEL D'ACTION

Séquence stéréotypée de la modification du potentiel de membrane d'une cellule excitable. Le potentiel d'action est constitué d'une dépolarisation (le potentiel d'action atteint + 30 mV), suivie d'une repolarisation puis d'une hyperpolarisation transitoire avant de revenir à la valeur du potentiel de repos (– 70 mV). La durée du potentiel d'action est de quelques millisecondes. Le potentiel d'action constitue le signal élémentaire du message nerveux.

POTENTIEL DE MEMBRANE

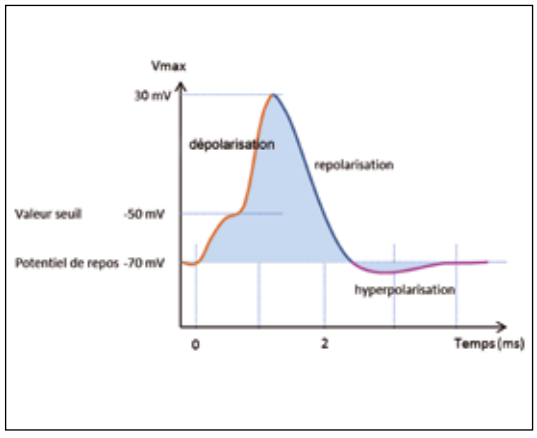
Différence de potentiel électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la membrane plasmique de toute cellule. Le potentiel membranaire dit « de repos » est le potentiel de membrane d'une cellule excitable en l'absence de stimulation et sa valeur est de – 70 mV (l'intérieur de la cellule est plus électronégatif que l'extérieur de la cellule).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Cette zone de contact entre les deux neurones est appelée **synapse**. Le message nerveux est alors transmis du neurone sensoriel au motoneurone. Les motoneurones cheminent par les racines ventrales (ou antérieures) des nerfs rachidiens jusqu'aux organes effecteurs que sont les muscles. La zone de contact entre le motoneurone et le muscle est appelée **synapse neuromusculaire** ou **plaque motrice**. La stimulation du motoneurone entraîne la contraction du muscle. Le trajet du message nerveux du récepteur sensoriel jusqu'à l'organe effecteur constitue un **arc réflexe**, qualifié de **monosynaptique**. En effet, durant tout le trajet nerveux, il n'existe qu'une seule synapse, située dans la substance grise de la moelle épinière, entre le neurone sensoriel et le motoneurone.

Le message nerveux

Toute cellule est caractérisée par un potentiel membranaire de repos, dont la valeur est de – 70 mV. Dans certaines cellules dites « excitables » comme les **neurones**, cette valeur du potentiel membranaire peut être modifiée. Si la stimulation du neurone est suffisante, elle entraîne la modification transitoire de ce potentiel membranaire, qui constitue un potentiel d'action membranaire. Un **potentiel d'action** correspond à une inversion transitoire du potentiel du neurone. Le potentiel d'action est toujours identique : il a toujours la même durée et la même amplitude (loi du « tout ou rien »). Il se propage le long de l'axone du neurone de proche en proche sans s'atténuer. Un **message nerveux** consiste en une succession de potentiels d'action transmis le long de l'axone d'un neurone. Le message nerveux est donc un message de **nature électrique** dont l'intensité est codée en fréquence de potentiels d'action.

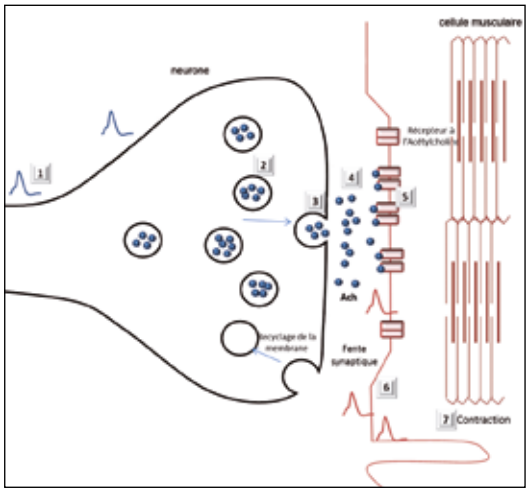


Le potentiel d'action : un message nerveux élémentaire

Du motoneurone à la cellule musculaire : la synapse neuromusculaire

Au niveau de la **synapse neuromusculaire**, zone de contact entre le motoneurone et le muscle, le message nerveux de nature électrique propagé dans le motoneurone est traduit au niveau de la fente synaptique en un message nerveux de **nature chimique**. Des **neuromédiateurs,** ici l'acétylcholine, sécrétés par le motoneurone se fixent sur des récepteurs spécifiques présents à la surface de la cellule musculaire. Cette fixation déclenche des potentiels d'action musculaires à l'origine de la **contraction du muscle**.

Ainsi, alors qu'au niveau d'un neurone, l'intensité du message nerveux, de nature électrique, est codée en fréquence de potentiel d'actions, au niveau de la synapse neuromusculaire, le message nerveux est de nature chimique et son intensité est codée en concentration de neuromédiateurs présents dans la fente synaptique.



Fonctionnement de la synapse neuromusculaire
Le message nerveux se propage sous forme de potentiels d'action le long du motoneurone (1) jusqu'à la terminaison synaptique. Des vésicules chargées d'acétylcholine (2) libèrent, par exocytose (3), leur contenu en neuromédiateurs dans la fente synaptique (4). La fixation de l'acétylcholine sur ses récepteurs localisés sur la membrane de la cellule musculaire (5) génère un potentiel d'action musculaire (6). Ce potentiel d'action musculaire déclenche la contraction du muscle (7). L'acétylcholine est ensuite dégradée dans la fente synaptique et des molécules sont réinternalisées par la terminaison synaptique du motoneurone tandis que la membrane est recyclée par endocytose.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• **Paralysés : des progrès à petits pas** p. 87
(Florence Rosier, *Le Monde Sciences et médecine* daté du 09.04.2014)

ZOOM SUR...

LE SYSTÈME NERVEUX

Ensemble de cellules, les neurones, qui transmettent l'information nerveuse dans l'organisme. Chez les vertébrés, on distingue :
– le système nerveux central comprend deux centres nerveux : le cerveau et la moelle épinière. Ces centres nerveux sont reliés entre eux par des faisceaux de fibres. Il contrôle l'ensemble du système nerveux ;
– le système nerveux périphérique, qui est formé de nerfs reliant la périphérie de l'organisme et le système nerveux central.

LA MOELLE ÉPINIÈRE

Centre nerveux situé sous l'encéphale appartenant au système nerveux central. Dans la moelle épinière, la substance blanche, périphérique, correspond aux axones des neurones, tandis que la substance grise, centrale, contient les corps cellulaires des neurones. Elle est recouverte par des membranes, les « méninges », et abrite en son centre le canal de l'épendyme. Au niveau des racines dorsales (ou postérieures) de la moelle épinière arrivent les fibres nerveuses sensorielles, dont les corps cellulaires des neurones sont contenus dans les ganglions rachidiens. Au niveau des racines ventrales (ou antérieures) sortent les fibres nerveuses motrices.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 2.1 : La myasthénie

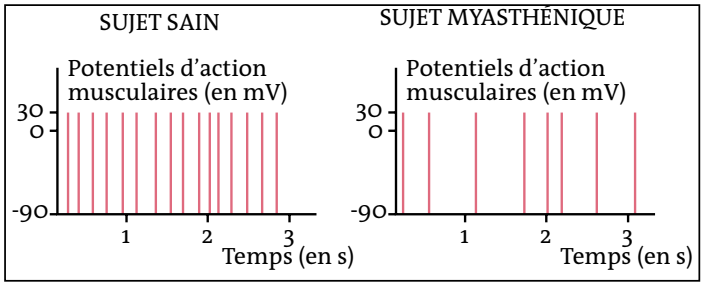
L'intitulé complet du sujet

La myasthénie est une maladie caractérisée par une faiblesse musculaire : les patients n'arrivent pas à contracter efficacement leurs muscles. Exploitez l'ensemble des résultats expérimentaux pour proposer une hypothèse expliquant la myasthénie.

Le document

Expérience 1

Sur un muscle d'un sujet sain et sur celui d'un sujet myasthénique, des électrodes réceptrices sont placées à proximité des synapses neuromusculaires. On enregistre alors les potentiels d'actions des cellules musculaires suite à une stimulation du motoneurone.



Expérience 2

L'α-bungarotoxine est une molécule toxique de venin de serpent, capable de se fixer sur des récepteurs à acétylcholine. L'injection d'α-bungarotoxine à une souris la rend incapable de contracter ses muscles.

Expérience 3

On étudie par autoradiographie la fixation de l'α-bungarotoxine radioactive sur les cellules musculaires d'un sujet sain et d'un sujet myasthénique ; le résultat est présenté dans le tableau suivant :

	sujet sain	sujet myasthénique
densité de l'α-bungarotoxine radioactive fixée sur les cellules musculaires	+++	+

Proposition de corrigé

Dans l'expérience 1, la stimulation du motoneurone déclenche un message nerveux transmis le long du motoneurone jusqu'à la synapse neuromusculaire, zone de jonction entre le motoneurone et le muscle. Chez le sujet sain, la stimulation du motoneurone entraîne un train soutenu de potentiels d'action musculaires (environ 6/9). Chez le sujet myasthénique, cette stimulation provoque un train de potentiels d'action musculaires de la fréquence plus faible (2/s). Chez le sujet malade, le message nerveux ne parvient donc pas correctement jusqu'au muscle.

L'α-bungarotoxine injectée à la souris l'empêche de contracter ses muscles. Cette toxine déclenche des symptômes similaires à ceux de la myasthénie. Or, l'α-bungarotoxine se fixe sur les récepteurs à acétylcholine de la synapse neuromusculaire. On émet donc l'hypothèse que l'α-bungarotoxine en se fixant sur les récepteurs à acétylcholine empêche celle-ci de s'y fixer : le message nerveux ne franchit pas la synapse, d'où l'absence de contraction des muscles de la souris. La myasthénie serait donc due à un dysfonctionnement de la transmission du message nerveux au niveau de la synapse neuromusculaire.

D'après l'expérience 3, la densité de l'α-bungarotoxine fixée sur la cellule musculaire est moins importante chez le sujet myasthénique que chez le sujet sain. On en déduit que la quantité de récepteurs capables de fixer des molécules comme l'α-bungarotoxine et l'acétylcholine est plus faible chez le sujet myasthénique que chez le sujet sain. Ainsi la myasthénie serait due à un nombre insuffisants de récepteurs pouvant fixer leur neuromédiateur : le message nerveux du motoneurone n'entraîne pas alors une contraction efficace du muscle.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Proposer une hypothèse sans justification s'appuyant sur les résultats expérimentaux.

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Maîtrise des connaissances avec question de synthèse

– Montrer comment le test d'un réflexe musculaire est un outil de diagnostic des anomalies du fonctionnement du système neuromusculaire. La synthèse sera accompagnée d'un schéma présentant le réflexe myotatique.

ZOOM SUR...

LES MOLÉCULES AGISSANT SUR LES SYNAPSES

De nombreuses substances naturelles ou de synthèse peuvent agir sur les synapses neuromusculaires et avoir une action biologique sur les muscles. Le mode d'action de ces molécules sur ces synapses est variable, comme l'illustrent les exemples suivants.

• Le curare est un poison végétal obtenu à partir de lianes d'Amérique du Sud, où il est utilisé, comme poison pour chasser par certaines tribus. Les pointes de flèches enduites de curare entraînent la paralysie de l'animal atteint. Comment le curare déclenche-t-il de graves paralysies musculaires ? Le curare se fixe à la place de l'acétylcholine sur les récepteurs de la synapse neuromusculaire et empêche le message nerveux de parvenir aux muscles. Le curare est donc un antagoniste de l'acétylcholine. Il est utilisé en médecine pour ses effets anesthésiants permettant le relâchement des muscles.

• La nicotine se fixe sur les récepteurs à acétylcholine et mime l'action de l'acétylcholine. Elle est qualifiée d'« agoniste » de l'acétylcholine.

• Le sarin est un gaz mortel, qualifié de « neurotoxique », qui déclenche une puissante contraction des muscles, c'est-à-dire une paralysie totale. Au niveau de la synapse neuromusculaire, l'acétylcholine fixée sur les récepteurs de la cellule musculaire est normalement éliminée par une enzyme appelée « acétylcholine estérase ». Or, le sarin inhibe cette enzyme : l'acétylcholine reste constamment fixée sur son récepteur, provoquant la contraction permanente des muscles. Le gaz sarin fut découvert en Allemagne en 1939 ; sa production et sa possession sont interdits par l'ONU depuis 1991. Depuis 2007, plus aucun pays ne devrait détenir ce gaz neurotoxique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Paralysés : des progrès à petits pas

Une équipe américaine est parvenue à faire exécuter des mouvements intentionnels des jambes à des patients paralysés des membres inférieurs.

Mardi 8 avril, la revue *Brain* a publié les saisissants résultats, chez l'homme, d'une stratégie de stimulation électrique de la moelle épinière. Quatre patients présentant une paralysie complète des membres inférieurs, après un accident survenu deux à quatre ans plus tôt, ont été capables d'exécuter de nouveau des mouvements intentionnels assez précis des jambes. Chaque année en France, de 1 000 à 1 500 personnes sont victimes de tels accidents — le plus souvent des adultes jeunes. A la suite d'une lésion plus ou moins complète de la moelle épinière, elles se retrouvent paralysées à des degrés variables.

Chez les quatre hommes suivis dans l'étude de *Brain*, une équipe américaine (université de Louisville et université de Californie à Los Angeles) a implanté un module de stimulation électrique dans *« l'espace épidural »* (entre la dure-mère et le canal vertébral) de la région lombo-sacrée. Là, précisément, où aboutissent les fibres des neurones qui contrôlent les muscles des jambes.

La stimulation continue de ces neurones a permis aux quatre patients de bouger de façon volontaire leur hanche, leur cheville, leurs orteils… *« Il faut abandonner l'idée qu'aucune récupération n'est possible après une paralysie complète »*, estime Susan Harkema, qui a conduit ce travail, financé par la Fondation Reeve et les NIH américains. Pour autant, *« on ne peut imaginer qu'avec cette seule intervention, ces patients remarcheront un jour dans la rue,* tempère le professeur Grégoire Courtine, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). *Mais c'est un résultat extrêmement prometteur : avec cette seule stimulation électrique, les quatre patients testés ont été capables de transformer une entrée auditive, par exemple la demande d'un médecin de bouger leur cheville, en une réponse motrice spécifique. »*

Grégoire Courtine est un spécialiste de *« neuro-réhabilitation »*, une stratégie combinant trois approches : une stimulation chimique et une stimulation électrique de la moelle épinière, associées à un entraînement physique. En 2012, son équipe publiait dans *Science* une étude qui a fait grand bruit. Les chercheurs parvenaient à rétablir une marche volontaire chez des rats rendus paraplégiques par une lésion médullaire de la moelle épinière. Ils injectaient dans la moelle, sous la lésion, un « cocktail » de molécules activatrices (adrénaline, noradrénaline, dopamine…). Puis ils appliquaient une stimulation électrique sur la moelle épinière. Les rats paraplégiques ainsi stimulés étaient placés sur un tapis roulant, soutenus par un harnais robotisé. Après deux mois d'entraînement, ils avaient réappris à marcher volontairement — quand la lésion n'était pas complète. *« Depuis 2012, nous avons progressé dans l'optimisation des technologies de stimulation électrique et d'entraînement robotique. Nous envisageons de prochains essais chez l'homme,* indique Grégoire Courtine. *Notre approche ne guérira pas les patients. Mais elle ambitionne d'améliorer leur qualité de vie. »*

Plusieurs approches complémentaires se consacrent à la régénération des neurones. « *Pourquoi, chez l'homme ou la souris, les fibres du système nerveux périphérique parviennent-elles à repousser, tandis que celles du système nerveux central [cerveau et moelle épinière] en sont incapables ? »*, s'interroge le professeur Bernard Zalc, qui a dirigé le Centre de recherche de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM, UPMC, Inserm, CNRS), à Paris. Une des réponses vient de la « myéline », cette gaine qui entoure certaines fibres nerveuses. *« Martin Schwab, de l'université de Zurich, a isolé les protéines de la myéline du système nerveux central. Et montré que l'une d'elles, NOGO, inhibe la repousse de l'axone »*, ce prolongement du neurone qui transporte le message nerveux, souligne Bernard Zalc.

Ce qui a conduit à la mise au point d'un anticorps anti-NOGO, inhibant cette inhibition. *« Cette approche s'inscrit dans une voie qui vise à rendre l'environnement neuronal plus favorable à la repousse des axones »*, note Geneviève Rougon (CNRS-université Aix-Marseille). Outre la piste de la myéline, est explorée la voie des astrocytes, des cellules au rôle ambigu. Tantôt elles semblent entraver la repousse axonale en formant une cicatrice autour de la lésion. Mais selon un travail publié dans *Science* le 1er novembre 2013, certains astrocytes bénéfiques se différencient à partir de cellules souches présentes dans la moelle épinière lésée. *« Si l'on perturbe cette barrière d'astrocytes, il y a moins de récupération fonctionnelle »,* souligne Grégoire Courtine.

Une stratégie de thérapie génique a été publiée le 2 avril dans *The Journal of Neurosciences*. Une équipe du King's College, à Londres, a injecté un vecteur viral dans la lésion médullaire de rats adultes. Ce vecteur contenait le gène d'une enzyme : une « chondroïtinase », qui digère des molécules s'accumulant autour de la lésion. Résultats : la repousse axonale a augmenté, favorisant la récupération des pattes arrière des rats traités.

Une autre approche consiste à modifier génétiquement les neurones lésés pour faire repousser leurs axones. *« De nombreux laboratoires cherchent à identifier, dans le système nerveux périphérique, les molécules favorisant la croissance et la régénération axonales. Il s'agit ensuite de promouvoir leur fabrication par les neurones lésés du système nerveux central »*, dit Florence Bareyre, de l'université Ludwig-Maximilians à Munich (Allemagne). A cet égard, le rôle bénéfique d'une protéine, PCAF, vient d'être montré (*Nature Communications*, 1er avril).

Toutes ces approches restent très en amont d'une application chez l'homme. D'autant que plusieurs essais ont été abandonnés. L'intérêt de l'anticorps anti-NOGO a ainsi été évalué chez l'homme. Mais cet essai, promu par le laboratoire Novartis, semble avoir été stoppé — en toute discrétion… De même, des start-up américaines avaient lancé de petits essais pour évaluer des greffes de cellules souches dans la moelle épinière de patients paralysés. Ces essais ont été interrompus. *« Une étape d'évaluation chez le primate est indispensable »*, note Grégoire Courtine.

Florence Rosier, *Le Monde Science et médecine* daté du 09.04.2014

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article montre l'importance de la moelle épinière, non pas dans le contrôle des réflexes, mais dans la locomotion chez les mammifères. En effet, l'article relate que chez des petits mammifères, suite à la lésion de la moelle épinière, des circuits neuronaux de la moelle épinière restent fonctionnels et peuvent être à l'origine de mouvements volontaires lorsque la section n'est pas totale. Cette locomotion nécessite une stimulation chimique et une stimulation électrique et s'accroît avec l'entraînement. Ces observations ouvrent des perspectives intéressantes pour la récupération de la locomotion chez l'homme après section de la moelle épinière.

L'article fait également le point sur les études réalisées à l'heure actuelle sur la régénération des neurones. Certaines molécules et cellules ont été identifiées comme intervenant dans le contrôle de la repousse des neurones et font l'objet de recherches. Des essais de thérapie génique sont également à l'étude. Bien que l'application de ces recherches chez l'homme soit encore loin, cela ouvre des perspectives quant à l'amélioration de la qualité de vie des personnes paralysées.

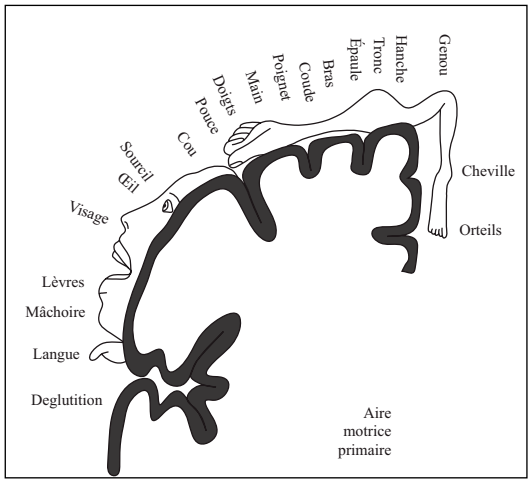
© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Motricité volontaire et plasticité cérébrale

Alors que les réflexes sont des mouvements inconscients, nous réalisons des mouvements volontaires : saisir un objet, marcher, courir, etc. Chez un tout jeune enfant, les premiers gestes semblent très maladroits : il ne sait pas attraper une balle ni faire quelques pas. Mais, à force de s'entraîner, de faire des erreurs et de recommencer, il apprend à maîtriser ses gestes. Comment les mouvements volontaires sont-ils contrôlés et comment expliquer l'évolution des capacités motrices ?

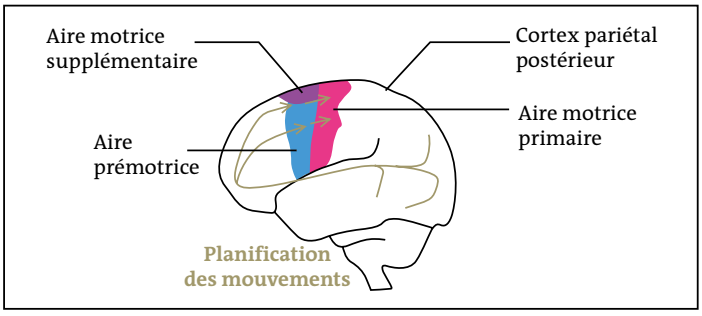
De la volonté au mouvement

L'enregistrement des **potentiels d'action** au niveau d'un motoneurone montre que les circuits nerveux impliqués dans le mouvement peuvent appartenir à l'arc réflexe myotatique ou provenir de l'encéphale. Les mouvements volontaires sont donc contrôlés par **l'encéphale**. L'exploration du cortex cérébral par les techniques d'**imagerie médicale** permet d'identifier les zones du cortex activées lors des mouvements musculaires volontaires. L'étude de cas cliniques, comme des lésions au niveau du cerveau entraînant des paralysies, ont également participé à la connaissance du cortex moteur.



Cartographie de l'aire motrice primaire (Homunculus de Penfield). Hémisphère gauche vue en coupe. Les parties du corps les plus mobiles, comme les mains, les lèvres ou la langue sont représentées hypertrophiées.

Les mouvements volontaires sont directement commandés par l'**aire motrice primaire** située dans chaque hémisphère cérébral. La cartographie précise de cette aire motrice primaire montre que chacune de ses régions correspond à l'innervation d'une région précise du corps. Plus la motricité de cette région corporelle est complexe, plus la région de l'aire motrice primaire qui lui est dédiée est importante. Les informations issues du cortex visuel situé à l'arrière du cerveau sont transmises à l'**aire prémotrice** et à l'**aire motrice supplémentaire**. L'aire prémotrice, impliquée plutôt dans la régulation de la posture, dicte à l'aire motrice la position optimale pour un mouvement donné, tandis que l'aire motrice supplémentaire influe sur la planification et l'initiation des mouvements en fonction des expériences passées. Le **cortex pariétal** postérieur joue également un rôle dans l'exécution du mouvement volontaire, en prenant en compte la position du corps, le geste à effectuer, etc., en intégrant les informations neurosensorielles reçues.



Organisation du cortex moteur

Les **neurones pyramidaux** de l'aire motrice primaire projettent leurs axones vers le bulbe rachidien puis vers la moelle épinière. Les voies motrices sont **croisées** : l'aire motrice primaire de l'hémisphère gauche contrôle les mouvements de la partie droite du corps et inversement. Les terminaisons synaptiques des neurones pyramidaux entrent en

ZOOM SUR...

LES ACCIDENTS VASCULAIRES CÉRÉBRAUX (AVC)

Les accidents vasculaires cérébraux touchent environ 150 000 personnes en France chaque année : dans 80 % des cas, l'AVC est dû à une diminution de l'apport sanguin (suite à un caillot par exemple) et dans 20 % des cas, l'AVC est causé par une hémorragie cérébrale. L'AVC ne concerne pas uniquement les personnes âgées : plus de 10 000 personnes de moins de 45 ans sont victimes d'un AVC chaque année.

Un des principaux facteurs de risque est l'hypertension artérielle. L'AVC présente des signaux d'alerte qu'il est parfois possible de reconnaître (troubles brutaux de la vision, de la parole, de la marche, paralysie d'une partie du corps, etc.).

L'AVC est une véritable urgence médicale : plus la victime est prise en charge rapidement et de manière adaptée dès les tous premiers signes, plus les chances de survie et de limiter les séquelles sont élevées.

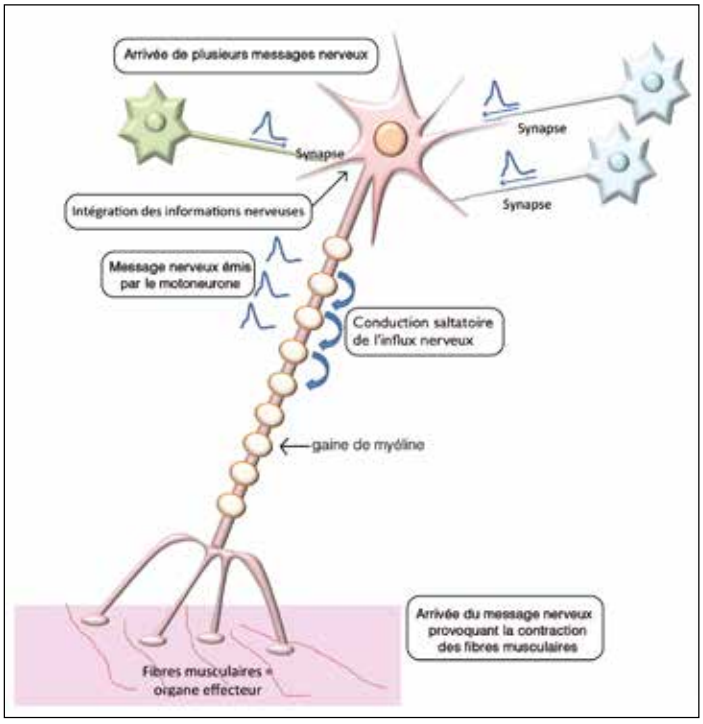
LES HÉMIPLÉGIES

Un accident (AVC, traumatisme) affectant le cortex moteur d'un seul hémisphère cérébral entraîne une paralysie du seul côté du corps situé à l'opposé de l'hémisphère cérébral touché : il s'agit d'une hémiplégie. En effet, la commande des mouvements volontaires est controlatérale (le cortex moteur droit commande les mouvements de la partie gauche du corps) car les voies motrices se croisent sous le bulbe rachidien.

LES PARAPLÉGIES

Une lésion de la moelle épinière peut être à l'origine de paralysie qui affecte les parties gauche et droite du corps. L'étendue de la partie du corps paralysée dépend de la hauteur à laquelle se situe la lésion. La paraplégie consiste en la paralysie du bassin et des jambes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Un motoneurone et ses connections

contact au niveau de synapses avec les motoneurones. Au niveau de la synapse, est libérée une quantité de neuromédiateurs en adéquation avec le train de potentiels d'action du neurone pré-synaptique. Le motoneurone est ainsi en relation avec un grand nombre de **synapses** certaines étant **excitatrices**, d'autre **inhibitrices**. Le motoneurone intègre alors l'ensemble des informations nerveuses qu'il reçoit par un **phénomène de sommation** qui est **spatiotemporelle**. Le message nerveux résultant au niveau du motoneurone est véhiculé jusqu'au muscle. Un même motoneurone peut innerver plusieurs fibres ou cellules musculaires, mais une fibre musculaire n'est toujours innervée que par un seul motoneurone.

Plasticité et motricité cérébrale

La comparaison des **cartes motrices** chez plusieurs individus montre l'existence de différences importantes. Pendant des périodes critiques (principalement pendant l'enfance), sous l'action de stimuli externes, des réorganisations des réseaux neuronaux se produisent. Par exemple, lors de l'apprentissage d'un instrument comme le violon, les violonistes droitiers utilisent les doigts de la main gauche (notamment l'annulaire et l'auriculaire) plus fréquemment que les non-violonistes. Lors de l'activation de l'auriculaire gauche, le nombre de dendrites activées au niveau du cortex est plus élevé chez les violonistes (40 000 à 80 000 dendrites activées) que chez les non-violonistes (1 000 à 35 000 dendrites activées). L'utilisation préférentielle d'un doigt augmente la représentation corticale de la zone contrôlant les mouvements du doigt stimulé, ainsi que l'activité des neurones des zones concernées. Ainsi, le cortex moteur présente une **plasticité cérébrale**, c'est-à-dire la capacité à établir de nouvelles connections entre les neurones. De nouvelles synapses se mettent en place : certaines vont disparaître, d'autres vont être maintenues et renforcées. De cette façon, les différences dans le cortex moteur s'acquièrent au cours du développement, lors de l'apprentissage des gestes et de l'entraînement. **L'architecture du cerveau** de chaque individu résultant de son développement est donc **unique**. Cette plasticité cérébrale, que l'on retrouve dans d'autres parties du cerveau, comme dans le cortex visuel, est une propriété générale du système nerveux central.

La plasticité cérébrale est aussi à l'origine de la **capacité de récupération du cerveau** après un accident affectant une petite partie du cortex moteur et entraînant une perte fonctionnelle. Par exemple, un **accident vasculaire cérébral** (AVC) est un trouble de l'irrigation sanguine du cerveau. Si une partie du cerveau cesse d'être irriguée à cause d'un AVC, alors les neurones meurent et cette partie cesse de fonctionner. Un AVC affectant une aire motrice peut ainsi entraîner une paralysie. Une récupération du déficit moteur est parfois observée. La zone affectée reste détruite, mais des remaniements affectant des zones voisines, permettent la récupération de la fonction motrice. Cette récupération est d'autant plus rapide qu'une rééducation est faite précocement.

De manière générale, le nombre de neurones diminue avec l'âge (10 % environ de perte au cours de la vie). Les apprentissages sont souvent plus aisés chez les jeunes enfants que chez les adultes : il semblerait que les possibilités de plasticité cérébrale diminuent avec l'âge, sans pour autant disparaître totalement. Les neurones que nous possédons constituent donc un véritable **capital à conserver et à entretenir**.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- **La longue réadaptation des patients** p. 91-92
(Florence Rosier, *Le Monde Science et médecine* daté du 31.05.2017)
- **Le cerveau fabrique de nouveaux neurones** p. 92
(Hervé Morin, *Le Monde* daté du 27.03.2019)

NOTIONS CLÉS

CORTEX MOTEUR, AIRE MOTRICE

Partie du cortex cérébral spécialisée dans la commande des mouvements volontaires et qui contient une aire motrice primaire, une aire motrice supplémentaire et une aire prémotrice.

CORTEX

Zone de faible épaisseur, recouvrant la totalité du cerveau et formée par la substance grise (correspondant aux corps cellulaires des neurones). L'épaisseur du cortex est d'environ de 2 à 4 mm, sa superficie représente 2 200 m², soit plus de 80 % de la masse totale du cerveau. Le cortex contient différentes aires, spécialisées dans des fonctions spécifiques.

INTÉGRATION NERVEUSE

Capacité des neurones à élaborer un message nerveux résultant de la réception de plusieurs messages nerveux. On distingue la sommation « spatiale » (prise en compte des messages nerveux issus de différentes synapses) et la sommation « temporelle » (prise en compte des différents messages provenant d'une même synapse sur un laps de temps de quelques millisecondes). La plupart du temps, la sommation réalisée est spatio-temporelle.

PLASTICITÉ CÉRÉBRALE

Capacité du cerveau à évoluer d'un point de vue anatomique et fonctionnel sous l'effet de l'environnement, lors d'un apprentissage ou d'une rééducation. Cette plasticité cérébrale s'explique par la réorganisation de circuits neuronaux dus aux modifications des synapses.

SOMMATION

Le corps cellulaire du motoneurone reçoit de nombreuses informations qu'il doit intégrer, c'est-à-dire faire le bilan « algébrique » (ou sommation) des messages inhibiteurs et excitateurs reçus, pour créer un message moteur unique en direction des fibres musculaires.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Partie 1 : Motricité volontaire et plasticité cérébrale

1. Le neurone moteur conduit un message nerveux :
a) codé en fréquence de potentiel d'action vers les centres nerveux.
b) codé en amplitude de potentiel d'action vers le muscle effecteur.
c) présentant toujours la même fréquence et la même amplitude de potentiel d'action.
d) codé en fréquence de potentiel d'action vers le muscle effecteur.

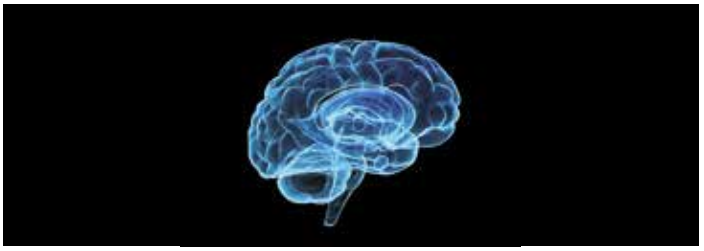
2. Une fibre musculaire :
a) reçoit un message nerveux issu de plusieurs motoneurones.
b) reçoit un message nerveux issu d'un seul motoneurone.
c) est capable de réaliser une intégration des messages nerveux.
d) se relâche lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un motoneurone.

3. Au niveau du cerveau, les cartes motrices :
a) sont innées, présentes dès la naissance.
b) restent identiques tout au long de la vie de l'individu.
c) sont identiques chez tous les individus d'une même espèce.
d) peuvent évoluer en fonction de l'apprentissage.

4. Le cortex moteur :
a) contient l'aire motrice primaire.
b) contient plusieurs aires qui communiquent entre elles.
c) est situé en profondeur dans le cerveau.
d) est situé à l'arrière du cerveau.

5. La partie du corps la plus représentée au niveau de l'aire motrice primaire est :
a) le visage.
b) l'épaule.
c) le genou.
d) l'avant-bras.

6. Un accident vasculaire cérébral dans le cortex moteur de l'hémisphère droit peut entraîner :
a) une paralysie de la partie droite du corps.
b) une paralysie des deux membres supérieurs.
c) une paralysie des deux membres inférieurs.
d) une paralysie de la partie gauche du corps.



7. Une lésion de la moelle épinière entraîne :
a) une paralysie d'un seul côté du corps.
b) une paralysie de tout le corps.
c) une paralysie de la partie du corps située au-dessus de la lésion.
d) une paralysie de la partie du corps située en dessous de la lésion.

8. La plasticité cérébrale :
a) est due à une augmentation du nombre de neurones.
b) est due à un remaniement des réseaux neuronaux.
c) s'intensifie avec l'âge.
d) est indépendante de l'environnement.

Le corrigé

1. d), 2. b), 3. d), 4. b), 5. a), 6. d), 7. d), 8. b)

AUTRES SUJETS POSSIBLES AU BAC SUR CE THÈME

Étude de documents
– Cartographie du cortex moteur à partir de données de l'imagerie cérébrale.
– Fonctionnement des synapses, intégration nerveuse.
– Contrôle du muscle par les motoneurones.
– Conséquences des AVC et des lésions de la moelle épinière sur la motricité.
– Mise en évidence de la plasticité cérébrale et évolution avec l'âge.

Ce qu'il ne faut pas faire

• Cocher deux réponses ou ne cocher aucune réponse
• Ne pas mobiliser les notions du cours.

ZOOM SUR...

LA MALADIE DE PARKINSON

La maladie de Parkinson est une maladie neurodégénérative à évolution lente. Les principaux symptômes sont les tremblements de la main ou du pied, la lenteur des mouvements et la raideur du corps. La maladie de Parkinson se caractérise par une dégénérescence de neurones situés à la base du cerveau, contrôlant les mouvements automatiques et sécrétant un neurotransmetteur appelé la « dopamine ». Un traitement à base de L-dopa, un précurseur de la dopamine, améliore les symptômes pendant plusieurs années puis perd de son efficacité. La maladie de Parkinson concerne principalement les personnes de plus de 60 ans. Elle affecte 0,3 % de la population générale. C'est la deuxième maladie neurodégénérative la plus courante après la maladie d'Alzheimer.

L'IRM

L'IRM, ou « imagerie par résonnance magnétique », est une technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des images du cerveau, mais aussi d'autres organes. Sa résolution est assez élevée : elle permet de voir des structures dont la taille est inférieure à un millimètre. Grace à l'IRM, des coupes virtuelles du cerveau peuvent être réalisées pour caractériser des pathologies. L'imagerie par résonnance magnétique fonctionnelle (IRMf) permet de caractériser l'activité des différentes parties du cerveau. Elle est donc particulièrement utilisée en recherche pour étudier le fonctionnement cérébral.
D'autres techniques d'imageries médicales comme la TEP (tomographie par émission de positons) ou encore le scanner (appelé aussi « tomodensitométrie » ou « scanographie ») ont permis ces trente dernières années de progresser dans les diagnostics des atteintes cérébrales et dans les recherches en neurosciences.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La longue réadaptation des patients

La salle de kinésithérapie est une lente ruche. En ce matin de mai, on y butine précieusement chaque petit progrès. Jamais patients n'ont autant mérité leur nom. Il y a quelques semaines ou quelques mois, la foudre s'est abattue sur leur tête. Une des grosses artères irriguant leur cerveau s'est bouchée ou rompue brutalement, endommageant une partie de leur tissu cérébral. Cet accident vasculaire cérébral (AVC) leur a laissé des séquelles : une paralysie d'un côté du corps (hémiplégie), un trouble de la parole (aphasie), un déficit visuel...

Nous sommes dans le service de médecine physique et de réadaptation de l'hôpital Fernand-Widal (AP-HP), à Paris. Chaque matin, les patients y suivent une rééducation adaptée : kiné, orthophonie, ergothérapie... Leur obsession ? Se délivrer au mieux d'un handicap qui les mine, retrouver une forme d'autonomie. *« La moitié de nos patients ont eu un AVC. Les autres ont souffert d'un traumatisme crânien, d'un cancer du cerveau ou d'une hernie discale »*, indique le professeur Alain Yelnik, qui dirige ce service.

Ce qui impressionne, dans cette pièce qui unit tant d'efforts et tant de souffrances, c'est la volonté, l'opiniâtreté de ceux que le sort a frappés. Concentrés, ils luttent en silence. A leurs côtés, des équipes soignantes au dévouement exemplaire. Aucune infantilisation des patients. Ici, c'est Marie Wannepain, kinésithérapeute, qui tente une première mise en position debout d'un jeune homme fauché par un AVC sévère. Là, un autre kiné, Paul Raynaud, mobilise les articulations de la main d'une septuagénaire qui grimace. *« Le but est de limiter les raideurs des doigts liées à l'hémiplégie. C'est un peu douloureux »*, explique-t-il.

Plus loin, un homme et une femme hémiplégiques règlent eux-mêmes les paramètres d'un « pédalier assisté ». Plus loin encore, un homme déambule avec précaution sur un tapis roulant, suspendu par un harnais. *« L'AVC a touché le cervelet, qui joue un rôle crucial dans la coordination des mouvements. D'où ses troubles de l'équilibre »*, indique Alain Yelnik. Ce tapis sert parfois de robot de locomotion : le patient a les jambes maintenues par un exosquelette qui lui fait exécuter les mouvements de la marche. La rééducation par la contrainte est aussi employée : elle consiste à empêcher le patient d'utiliser sa main ou sa jambe valide, pour qu'il fasse appel au membre paralysé.

Nous voici maintenant dans la salle d'ergothérapie. *« Notre but est de redonner au patient une autonomie dans ses gestes du quotidien : s'habiller, faire sa toilette, prendre ses repas... Nous effectuons aussi des visites à domicile »*, détaille Alix Passieux, l'ergothérapeute.

Un jeune homme au crâne couturé déplace, à l'aide de son bras, un robot couplé à un ordinateur : les yeux rivés à l'écran, il fait circuler une voiture sur un parcours virtuel. Une dame de 86 ans joue à un jeu de société, Le Lynx. Elle s'attache à reconnaître des objets très variés, sur un plateau qui affiche plusieurs centaines d'images. Depuis son AVC, elle a perdu la vision dans toute la moitié gauche de son champ visuel. Mais ses progrès sont notables : *« Elle reconnaît maintenant bien plus d'objets dans le champ visuel déficient »*, note Alix.

« Les premiers mois après un AVC, notre obsession est de stimuler une véritable récupération », insiste Alain Yelnik. Cette récupération repose sur la « plasticité cérébrale », cette étonnante capacité qu'a notre cerveau de se réorganiser face à une situation nouvelle, comme un apprentissage ou une lésion. Si les neurones qui contrôlent la main ont été détruits, par exemple, leurs congénères épargnés qui contrôlent le coude pourront prendre le relais.

« La plasticité cérébrale est éminemment variable d'une personne à l'autre en fonction de nombreux facteurs tels que l'âge, l'existence d'un risque vasculaire ou de lésions cérébrales préexistantes, les prédispositions génétiques, la situation psychologique ou affective... », écrit Marie-Germaine Bousser, neurologue, dans son ouvrage *AVC : en réchapper et y échapper* (Le Muscadier-Inserm, 2016).

L'âge ne fait pas tout. En février, un AVC a fauché Marie-Louise Leblanc, âgée de 80 ans, qui était seule à son domicile. *« Je suis restée vingt-quatre heures à terre. Ça travaille alors dans la tête ! »* Après neuf jours de soins intensifs à l'hôpital Lariboisière (Paris), elle restera deux mois dans le service de Fernand-Widal. Depuis peu, elle est rentrée à son domicile malgré son hémiplégie modérée. *« On m'a dit que j'avais eu beaucoup de chance. Ici, je vois mes progrès. J'espère me promener bientôt dans les jardins ! »* Une autre patiente de 86 ans a étonné ce service : *« Malgré son AVC sévère, elle a récupéré sa capacité de lecture »*, indique Alain Yelnik.

Stimulation intense

Deux facteurs sont déterminants. D'une part, l'intensité et la variété des stimulations cérébrales. *« Dans l'idéal, il faut deux à trois heures de rééducation par jour, dès le quatrième ou cinquième jour après l'AVC. Cette rééducation doit rester plaisante. Mais on n'hésite plus à pousser le patient un peu au-delà de ses limites. »*

Second facteur-clé : l'état du cerveau, qui dépend bien sûr du siège et de la taille de la zone détruite. *« Quand l'AVC endommage une aire capitale comme la "capsule interne", où passent tous les neurones moteurs du cortex qui se projettent vers le tronc cérébral, le patient ne pourra pas récupérer de mouvements. »*

L'état antérieur du cerveau joue également. *« Les fonctions cognitives, par exemple, résultent de l'activité de vastes réseaux de neurones interconnectés. Si les câblages de la région lésée restent intacts, le patient pourra mobiliser d'autres réseaux »*, explique Paolo Bartolomeo, chercheur à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM), à Paris. Une communication efficace entre l'hémisphère sain et l'hémisphère lésé est essentielle. Une structure du cerveau apparaît cruciale : c'est le corps calleux, ce vaste éventail de fibres qui relie les deux hémisphères. En 2015, l'équipe de Paolo Bartolomeo a montré que la présence d'un déficit du corps calleux nuit à la récupération cognitive post-AVC.

En cas d'hémiplégie, la jambe récupère toujours plus vite que le bras atteint. *« Cela tient au fait que nos jambes occupent dans notre cortex une place beaucoup plus modeste que nos bras »*, dit Alain Yelnik. De un à trois mois après l'accident, le patient a retrouvé le maximum de ses capacités de marche. Pour le bras, ce délai est de six mois à un an. Pour la parole, il atteint deux à trois ans.

D'autres techniques de rééducation post-AVC, encore expérimentales, sont en développement. Parmi elles, la stimulation magnétique transcrânienne. *« Elle donne des résultats encourageants. Mais son efficacité doit être confirmée, d'autant qu'elle nécessite un matériel coûteux »*, estime Alain Yelnik.

Florence Rosier, *Le Monde Science et médecine* daté du 31.05.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'intérêt de cet article est de nous immerger dans le service de médecine physique et de réadaptation d'un hôpital parisien, pour nous faire côtoyer les patients atteints d'un accident vasculaire cérébral (ou AVC) et le personnel médical qui les entoure. Les AVC entraînent souvent des séquelles handicapantes pour le patient, comme des paralysies, des troubles de la parole, de la vision... L'objectif des équipes médicales est de permettre une récupération des fonctions affectées par l'AVC en sollicitant les capacités de plasticité cérébrale du cerveau, notamment en débutant la rééducation dès les premiers jours après l'AVC. Les capacités de plasticité cérébrale et donc de récupération sont variables selon les individus, notamment en fonction de l'âge, des zones du cerveau touchées ou encore de l'état du cerveau avant l'AVC.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le cerveau fabrique de nouveaux neurones

La neurogenèse est abondante chez l'adulte, et s'effondre en cas d'Alzheimer.

Santiago Ramon y Cajal (1852-1934), Nobel de physiologie et de médecine (1906), avait établi que le cerveau adulte ne produisait pas de nouveaux neurones, *« une fois les sources de croissance et de régénération irrévocablement taries »*. Mais il laissait une porte ouverte : *« Ce sera à la science du futur de changer, si possible, ce rude décret. »* Un siècle plus tard, *« nous y sommes, je pense »*, estime sa compatriote Maria Llorens-Martin (Université autonome de Madrid). Dans une étude publiée dans *Nature Medicine*, lundi 25 mars, son équipe établit de façon solide que, chez l'homme, des neurones continuent à être produits en abondance, y compris au-delà de 80 ans – sauf en cas de maladie d'Alzheimer.

A vrai dire, les conclusions de Cajal avaient déjà été battues en brèche chez les rongeurs (pour l'olfaction), et questionnées pour l'homme dès les années 1960. Puis plus récemment, notamment en déduisant l'âge des neurones de la mesure de la décroissance radioactive du carbone 14 issu des retombées des essais atomiques dans l'atmosphère.

Mais il y a tout juste un an, le dogme cajalien reprenait des couleurs grâce à une étude parue dans *Nature* suggérant que, passée l'enfance, la neurogenèse chutait brutalement pour devenir indétectable chez l'adulte. Ces nouvelles observations ont aussitôt été mises en doute, mais Maria Llorens-Martin et ses collègues semblent apporter un point final à cette dispute. Ils ont étudié les hippocampes droits prélevés sur 53 cerveaux humains donnés à la science – l'hippocampe est une structure jouant notamment un rôle fondamental dans la mémoire et la navigation spatiale.

Grâce à divers marqueurs biologiques spécifiques des différentes étapes de maturation des neurones observées chez le rongeur, des populations de jeunes neurones ont pu être identifiées – permettant aussi de mettre au jour des formes différentes chez ces cellules, selon leur maturité.

Cas d'école sur les protocoles

Comment expliquer des résultats aussi contradictoires, à un an d'intervalle ? D'abord, les tissus ont été fixés très rapidement après leur prélèvement, et ensuite les Espagnols ont utilisé trois techniques de marquage biologique en plus de celle employée habituellement, explique Maria Llorens-Martin. Elle espère que le protocole ainsi validé va devenir la référence dans les banques de cerveau qui permettent l'étude de diverses maladies neurologiques. *« Cet article va devenir un cas d'école sur les protocoles à utiliser »*, confirme le neurobiologiste Pierre-Marie Lledo (Institut Pasteur), qui se dit *« impressionné par toutes les méthodes mises en œuvre pour éviter les artefacts »*.

La confirmation d'une neurogenèse active jusque dans le grand âge va nourrir des questions passionnantes pour la neurologie et la psychiatrie. Comment accumule-t-on et élague-t-on les souvenirs ? Les nouveaux neurones s'additionnent-ils aux précédents, ou viennent-ils les remplacer ? *« Chez le rongeur, on a observé une addition chez le jeune, puis un remplacement »*, note Pierre-Marie Lledo. Les observations madrilènes vont-elles aider à combattre Alzheimer ? Il faut rester prudent, estime le chercheur : *« L'observation d'une chute de la neurogenèse établit une corrélation, pas une causalité. »*

Hervé Morin, *Le Monde* daté du 27.03.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

Depuis plusieurs années, des résultats contradictoires sont obtenus par des équipes de recherche sur la formation de nouveaux neurones, appelée neurogénèse, dans le cerveau humain adulte. Alors que certaines équipes avaient conclu que l'hippocampe, une petite structure du cerveau spécialisée notamment dans la mémoire, était le lieu d'une neurogénèse chez l'adulte, une étude ultérieure venait contredit ce résultat. **Cet article relate le résultat d'une étude très récente, qui confirme que l'hippocampe du cerveau humain adulte est capable de neurogénèse, même à un âge avancé.** Cette étude montre également que cette neurogénèse est absente chez les individus atteints de la maladie d'Alzheimer. Le cerveau adulte semble donc bien capable de fabriquer de nouveaux neurones et il s'agit maintenant de préciser leur rôle, en particulier en lien avec les maladies neurodégénératives.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE GUIDE PRATIQUE

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Épreuve écrite de SVT

Partie 1 : Maîtriser ses connaissances

Cette partie, qui porte sur une ou plusieurs parties du programme spécifique, a pour objectif d'évaluer les connaissances du candidat selon l'une des modalités variables :

– une **question de synthèse** portant sur une ou plusieurs parties du programme spécifique ;

– un **QCM** portant sur une partie ou plusieurs parties du programme spécifique, voire tout le programme. Ce QCM peut prendre appui sur des **documents** ;

– **l'association d'un QCM (avec ou sans documents) et d'une question de synthèse**.

Dans la question de synthèse sont évaluées la **maîtrise des connaissances** du candidat et sa capacité à les mobiliser et à les présenter de manière cohérente pour **répondre à la question posée**. La **qualité de la rédaction** est un critère important de l'évaluation. Il est donc essentiel d'identifier précisément la **problématique** à partir de l'énoncé pour délimiter le sujet et ainsi éviter tout hors-sujet ou tout oubli d'une partie du sujet. La réponse attendue doit contenir une **introduction** (qui définit les termes du sujet, pose clairement la problématique et annonce le plan), un **développement cohérent** et une **conclusion** (qui propose un bilan répondant à la problématique puis une ouverture vers un thème voisin du sujet étudié). Le développement est structuré en différents paragraphes dont chacun développe un aspect du sujet de manière cohérente et argumentée. Des titres numérotés mis en valeur peuvent être présents mais ne sont pas exigibles. **Le travail au brouillon** est impératif pour construire le plan de la synthèse : lisez bien l'énoncé, qui peut indiquer le plan à suivre, et mobilisez les notions vues en cours se rapportant au sujet. Prévoyez alors les **schémas** nécessaires pour illustrer les notions choisies. Dans tous les cas, suivez bien les consignes de l'énoncé (par exemple un schéma-bilan est souvent exigé). Les schémas doivent être assez grands, clairs, en couleurs et accompagnés de légendes et d'un titre.

Dans le cas d'un QCM, pour chaque question, quatre propositions sont faites. Une seule proposition est exacte, les autres sont fausses. Il ne faut **jamais cocher deux propositions** car cela invalide automatiquement la réponse. En général, seules les bonnes réponses rapportent des points et

l'absence de réponse ou une réponse erronée n'enlève pas de point. Les candidats ont donc toujours intérêt à cocher une proposition, même s'ils ne sont pas sûrs de leur réponse.

Partie 2 – Exercice 1 : Raisonner dans le cadre d'un problème scientifique

Cet exercice de la partie 2 porte sur le programme spécifique et vise à évaluer la capacité du candidat à **raisonner dans le cadre d'un problème scientifique** proposé par le sujet, en s'appuyant sur l'exploitation d'un nombre réduit de **documents**. La réponse peut se présenter sous forme d'un QCM ou d'une réponse rédigée.

Dans le cas d'une réponse rédigée, il s'agit de construire un raisonnement répondant au problème posé en exploitant les informations contenues dans les documents. Il peut s'agir par exemple de comparer des éléments, d'argumenter, d'extraire et d'organiser des informations, de relier des informations entre elles à partir des documents fournis, etc. La **qualité** et la **rigueur du raisonnement** sont les principaux critères de l'évaluation de cet exercice. Aucune restitution de connaissances n'est exigée mais les connaissances du candidat peuvent être utiles pour **analyser les documents**. La réponse attendue comporte, en général, une courte **introduction** posant la problématique et un **développement structuré** en différents paragraphes (sans titres apparents) qui présentent le raisonnement.

Dans le cas d'un QCM, il faut choisir à partir de l'exploitation des documents la **bonne réponse parmi les quatre propositions** présentées pour chaque question. Comme pour la partie 1, aucune justification

LES SVT AU BAC

Coefficient : 6 ou 8 pour les candidats ayant choisi la SVT comme enseignement de spécialité.

ÉPREUVE PRATIQUE

(évaluation des compétences expérimentales) :
sur 4 points ; durée : 1 h.
Épreuve écrite :
sur 16 points ; durée : 3 h 30.

PARTIE 1 DE L'ÉCRIT

Notée sur 8 points, elle évalue la maîtrise des connaissances acquises dans le cadre du programme spécifique de SVT. Le questionnement se présente sous forme d'un QCM ou d'une question de synthèse ou d'un QCM et une question de synthèse qui peuvent éventuellement s'appuyer sur un ou plusieurs documents. Cette partie peut porter sur une, plusieurs ou toutes les parties du programme.

PARTIE 2 DE L'ÉCRIT

Notée sur 8 points, elle évalue la pratique du raisonnement scientifique et de l'argumentation. Elle comporte deux exercices :

– le premier exercice, noté sur 3 points, évalue la capacité du candidat à raisonner dans le cadre d'un problème scientifique proposé par le sujet, en s'appuyant sur l'exploitation d'un nombre réduit de documents. Le questionnement se présente sous forme d'un QCM ou d'une question ouverte ;

– le second exercice, noté sur 5 points, évalue la capacité du candidat à pratiquer une démarche scientifique dans le cadre d'un problème scientifique à partir de l'exploitation d'un ensemble de documents et en utilisant ses connaissances.

Pour les candidats qui n'ont suivi que l'enseignement spécifique de SVT, les deux exercices de la partie 2 peuvent porter sur la même partie ou non du programme spécifique. Pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT, le second exercice de la partie 2 porte sur l'un des thèmes de spécialité.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

écrite n'est attendue, mais la lecture attentive des documents et leur compréhension sont indispensables pour sélectionner les bonnes réponses du QCM.

Partie 2 – Exercice 2 : Pratiquer une démarche scientifique

Cet exercice porte soit sur le programme spécifique pour les candidats n'ayant pas choisi la spécialité SVT, soit sur un des thèmes de spécialité pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT.

L'objectif est d'évaluer la capacité du candidat à **pratiquer une démarche scientifique** dans le cadre de la **résolution d'un problème scientifique** en exploitant différents **documents mis en relation** et en **mobilisant ses connaissances**. Le candidat doit exposer sa démarche personnelle de résolution du problème en élaborant une véritable **argumentation** qui conduit à une résolution possible du problème posé et en proposant une **conclusion** répondant à ce problème. L'énoncé précise souvent qu'aucune étude exhaustive des documents n'est attendue : il ne s'agit pas d'analyser les documents dans leur intégralité mais d'en **extraire les informations** utiles à la résolution du problème posé, de les relier entre elles et aux connaissances du candidat.

Dans cet exercice sont principalement évaluées la **cohérence de la démarche** proposée par le candidat, sa capacité à **justifier ses choix** dans la résolution du problème et à **faire preuve d'esprit critique**. Plusieurs démarches de résolution du problème peuvent être possibles : le candidat choisit celle qui lui paraît la plus appropriée en la justifiant rigoureusement à l'aide des informations extraites des documents.

La réponse attendue comporte, en général, une **introduction** présentant la problématique, un **développement structuré** en différents paragraphes (sans titres apparents) présentant la démarche de résolution, puis une **conclusion** résumant la résolution du problème. Le candidat doit veiller à bien **respecter la forme de la réponse exigée** par l'énoncé : compte-rendu d'une sortie sur le terrain, analyse d'un projet technique, etc. Les documents ne sont pas à analyser dans l'ordre donné par l'énoncé mais selon l'**ordre logique** pour résoudre le problème. **Un travail au brouillon** est nécessaire pour analyser les documents, sélectionner les informations issues des documents permettant de traiter la problématique, puis construire le plan de la réponse à l'aide des éléments issus des documents, mis en relation entre eux et avec les éléments de connaissances nécessaires.

Préparer l'épreuve du bac

Au cours de l'année, au fur et à mesure des chapitres, réalisez des **fiches** où figurent le plan du cours, les notions essentielles, les définitions des mots clés ainsi que les schémas importants à connaître. Ce travail permet de sélectionner les **notions essentielles**, de les mémoriser et les revoir rapidement lors des révisions avant les épreuves.

Retravaillez bien les corrections des évaluations faites en classe et entraînez-vous sur des sujets de type bac.

Développer votre culture générale

Les sujets font de plus en plus appel à votre culture générale. Celle-ci vous sera également utile pour la suite de vos études, pour des concours ou des entretiens. Suivez les **grandes lignes de l'actualité** régulièrement (radio, télévision, presse écrite papier ou numérique) et approfondissez, par des **lectures**, les sujets qui peuvent se référer au programme. Les articles du *Monde* proposés ici visent à vous faciliter cette ouverture sur l'actualité et la mise relation entre avec les recherches scientifiques et le cours enseigné.

LES SVT AU BAC

GÉRER SON TEMPS

Consacrez 10 minutes en début d'épreuve à la lecture de l'ensemble du sujet et au choix de l'ordre dans lequel vous allez traiter les exercices. Fixez alors une durée de travail pour chaque exercice et veillez à la respecter au mieux en contrôlant régulièrement l'heure. Traitez l'ensemble du sujet même si vous maîtrisez moins bien une partie du programme. Avant la fin de l'épreuve, prévoyez 5 à 10 minutes pour relire votre copie et corriger les fautes de sens et d'orthographe.

GÉRER SON STRESS

La veille de l'épreuve, éviter les révisions intensives tardives et essayez d'arriver en forme, détendu mais motivé, le jour des épreuves. Préparez votre matériel pour composer (y compris une boisson et un petit en-cas). Avant le début de l'épreuve, prenez quelques minutes pour vous détendre en respirant calmement. Essayez de faire de votre mieux quelles que soient les difficultés rencontrées et profitez du temps imparti à l'épreuve pour améliorer votre copie.

ÉPREUVE ORALE DE RATTRAPAGE

Préparation : 20 minutes.

Présentation : 20 minutes.

Le candidat tire au sort un sujet de deux questions. Pour les candidats qui n'ont pas choisi la spécialité SVT, elles portent sur deux parties différentes du programme spécifique de SVT. Pour les candidats ayant choisi la spécialité SVT, une question porte sur le programme spécifique et l'autre sur l'un des thèmes de spécialité. Les sujets comportent des documents semblables à ceux étudiés en cours durant l'année. Comme l'épreuve a lieu dans une salle comportant du matériel de SVT, le candidat peut être interrogé sur le matériel expérimental et son utilisation, sans être amené à le manipuler.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Crédits

Couverture

Vue aérienne de montagnes de Reine à Lofoten © franckreporter/iStock

Génétique et évolution

Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique
p. 6 gauche, DR, droite © Lézarts Création ; p. 7, DR ; p. 8, DR ; p. 9, © RDE.
Diversification génétique et diversification des êtres vivants
p. 12 © RDE ; p. 13 haut © RDE, bas, DR ;
p. 14 « Zoom sur… » © Istockphoto/ Thinkstock, partie centrale © Lézarts Création ; p. 15 DR.
De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité
p. 18 « Zoom sur… » gauche © RDE, « Zoom sur… » droite © Istockphoto/ Thinkstock, partie centrale © Lézarts Création ;
p. 19 partie centrale © RDE, « Zoom sur… » © Istockphoto/ Thinkstock p. 20 DR ;
p. 21 partie centrale DR, « Zoom sur… » © Istockphoto/ Thinkstock.
Un regard sur l'évolution de l'homme
p. 24 © RDE ; p. 25, DR ; p. 26 © RDE ;
Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée chez les plantes
p. 30 DR ; p. 31 DR ; p. 32 DR ; p. 33 DR ;

Le domaine continental et sa dynamique

La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale
p. 38 « Zoom sur… » et partie centrale droite © Lézarts Création, partie centrale gauche DR ;
p. 39 partie centrale haut DR, partie centrale bas et « Zoom sur… » © RDE ; p.40 DR.
Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs
p. 44 © Lézarts Création ; p. 45 partie centrale gauche © Lézarts Création, partie centrale droite DR, « Zoom sur… » © RDE ;
p. 46 carte © Lézarts Création, autres visuels DR ; p. 47 © RDE
Le magmatisme en zone de subduction : uneproduction de nouveaux matériaux continentaux
p. 50 partie centrale gauche DR, partie centrale droite © RDE ; p. 51 © Lézarts Création ;
p. 52 gauche © Lézarts Création, droite © RDE

Enjeux planétaires contemporains

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre
p. 56 DR ; p. 57 DR ; p. 58 gauche DR, droite © RDE
La plante domestiquée
p. 60 © Lézarts Création ; p. 61 gauche DR, droite © RDE ; p. 62 © RDE

Le maintien de l'intégrité de l'organisme : quelques aspects de la réaction immunitaire

La réaction inflammatoire, un exemple de réponse innée
p. 66 © Hemera/ Thinkstock ; p. 67 © RDE ; p. 69 DR
L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée
p. 72 DR ; p. 73 gauche DR, droite © Lézarts Création ; p. 74 © Istockphoto/ Thinkstock
Le phénotype immunitaire au cours de la vie
p. 79 haut DR, bas droite © Lézarts Création ; p. 80 © RDE

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle
p. 84 © Lézarts Création ; p. 85 gauche © Lézarts Création, droite DR ; p. 86 © RDE
Motricité volontaire et plasticité cérébrale
p. 88 © RDE ; p. 89 © RDE ; p. 90 © Hemera/ Thinkstock

Le guide pratique

p. 93 © FatCamera/iStock ; PeopleImages/iStock ; Steve Debenport/iStock ; fizkes/iStock ;
p. 94 © Istockphoto/ Thinkstock ; p. 95 © Purestock/ Thinkstock

EAN : 9782820810328
© rue des écoles – *Le Monde*, 2020
Éditions rue des écoles – 2 ter rue des Chantiers – 75005 Paris
Achevé d'imprimer en France par Aubin Imprimeur, en décembre 2019
Dépôt légal : janvier 2020

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

POUR FAIRE COURT, ÊTRE ASSUREUR MILITANT AUJOURD'HUI C'EST :

MAIF

assureur militant

MAIF - société d'assurance mutuelle à cotisations variables - CS 90000 - 79038 Niort cedex 9. Filia-MAIF - société anonyme au capital de 114 337 500 € entièrement libéré. RCS Niort 341 672 681 - CS 20000 - 79076 Niort cedex 9. Entreprises régies par le Code des assurances.

Réviser son bac avec Le Monde

CAHIER SPÉCIAL

Testez-vous pour le bac

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

55 questions

corrigées et commentées

rue des écoles

Génétique et évolution

Le brassage génétique et sa contribution à la diversité génétique

→ Le cours p. 6

Question 1

La méiose est différente de la mitose, car :

☐ **A.** elle sépare une cellule mère en quatre cellules filles en une division.

☐ **B.** elle n'est pas précédée d'une réplication de l'ADN.

☐ **C.** elle répartit les chromosomes de la cellule mère en quatre lots identiques.

☐ **D.** chaque cellule fille possède un chromosome de chaque paire de chromosomes homologues qui est présente initialement dans la cellule mère.

Question 2

Chacune des deux divisions de la méiose se déroule en 4 phases ordonnées comme suit :

☐ **A.** télophase, métaphase, anaphase et prophase.

☐ **B.** télophase, anaphase, métaphase et prophase.

☐ **C.** prophase, métaphase, anaphase et télophase.

☐ **D.** prophase, anaphase, métaphase et télophase.

Question 3

À l'issue de la première division de la méiose, chaque cellule fille contient :

☐ **A.** n chromosomes à 1 chromatide.

☐ **B.** n chromosomes à 2 chromatides.

☐ **C.** 2n chromosomes à 1 chromatide.

☐ **D.** 2n chromosomes à 2 chromatides.

Question 4

Lors d'un croisement-test, on croise des drosophiles hétérozygotes au corps gris [eb^+] et aux ailes longues [vg^+] avec des drosophiles homozygotes au corps ébène [eb] et aux ailes vestigiales [vg]. Les deux gènes étudiés sont indépendants.

☐ **A.** Les descendants se répartiront en un quart [$vg^+\,eb^+$], un quart [vg^+ eb], un quart [vg eb^+] et un quart [vg eb].

☐ **B.** Ce croisement-test permet de mettre en évidence le brassage intrachromosomique.

☐ **C.** Le résultat de ce croisement-test reflète la proportion des différents types de gamètes chez le parent homozygote.

☐ **D.** Ce croisement-test permet de mettre en évidence le brassage interchromosomique.

Diversification génétique et diversification des êtres vivants

→ Le cours p. 12

Question 5

La diversification du vivant s'opère :

☐ **A.** à la fois par des modifications affectant le génome et par des modifications n'affectant pas le génome.

☐ **B.** uniquement par des modifications affectant le génome.

☐ **C.** uniquement par des modifications qui n'affectent pas le génome.

Question 6

Les gènes de développement :

☐ **A.** peuvent être à l'origine de différences importantes dans le plan d'organisation des espèces.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **B.** s'expriment chez toutes les espèces avec la même intensité en une région donnée de l'organisme.
☐ **C.** peuvent présenter des séquences régulatrices différentes selon les espèces.
☐ **D.** s'expriment chez toutes les espèces selon la même chronologie d'expression.

Question 7

Les légumineuses, comme le haricot, portent sur leurs racines des nodosités remplies de bactéries, capables de fixer le diazote atmosphérique (N_2). La plante obtient ainsi des composés azotés provenant des bactéries tandis que les bactéries récupèrent des molécules organiques produites par la plante.

☐ **A.** Ces bactéries sont des parasites des plantes légumineuses.
☐ **B.** Il s'agit d'une symbiose.
☐ **C.** Il s'agit d'une diversification du vivant liée à une modification du génome.
☐ **D.** Il s'agit d'une diversification du vivant non liée à une modification du génome.

Question 8

Des chimpanzés sont capables de capturer des termites dans leur termitière en utilisant des brindilles de taille variable. Ce comportement est partagé par plusieurs communautés de chimpanzés.

☐ **A.** Ce comportement est le résultat d'un apprentissage basé sur l'imitation entre les individus.
☐ **B.** Il s'agit d'une diversification du vivant liée à une modification du génome.
☐ **C.** Il s'agit d'une diversification du vivant non liée à une modification du génome.
☐ **D.** La transmission de comportements entre les individus n'est observée que chez les primates.

De la diversification des êtres vivants à l'évolution de la biodiversité

→ Le cours p. 18

Question 9

La dérive génétique :

☐ **A.** est la modification aléatoire de la fréquence des allèles d'un gène dans une population au cours du temps.
☐ **B.** est d'autant plus marquée que la population est grande.
☐ **C.** contribue à augmenter la diversité génétique de la population.
☐ **D.** concerne les allèles conférant un avantage ou un inconvénient sélectif dans un milieu donné.

Question 10

Bien que le concept d'espèce soit délicat à définir, on peut néanmoins considérer qu'une espèce est :

☐ **A.** une population d'individus ayant le même nombre de chromosomes.
☐ **B.** une population d'individus isolée géographiquement d'autres populations.
☐ **C.** une population d'individus interféconds et qui est isolée génétiquement d'autres populations.
☐ **D.** une population d'individus ayant des caractères similaires.

Question 11

La spéciation, c'est-à-dire la formation de nouvelles espèces :

☐ **A.** résulte de l'apparition d'un isolement reproducteur entre les populations d'une même espèce
☐ **B.** ne peut avoir lieu que si les populations sont séparées géographiquement.
☐ **C.** a lieu systématiquement dès que des populations d'une même espèce sont isolées géographiquement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Un regard sur l'évolution de l'homme

→ Le cours p. 24

Question 12

Pour un fossile de grands primates, quels sont les critères requis pour appartenir au genre *Homo* ?

☐ **A.** Être bipède, avoir un fort prognathisme (mâchoire projetée vers l'avant), fabriquer et utiliser des outils.

☐ **B.** Être bipède, avoir les deux yeux orientés vers l'avant dans le même plan, des canines proéminentes et maîtriser le feu.

☐ **C.** Être bipède, avoir une grande capacité crânienne, fabriquer et utiliser des outils.

☐ **D.** Avoir une face réduite, une grande capacité crânienne et savoir grimper aux arbres.

Question 13

Dans l'histoire du genre *Homo* :

☐ **A.** les premiers représentants du genre *Homo* sont apparus en Afrique.

☐ **B.** les premiers *Homo sapiens* sont datés de -350 000 ans.

☐ **C.** seul *Homo sapiens* est sorti d'Afrique pour vivre sur les autres continents.

☐ **D.** à un même moment, il n'y a toujours eu qu'une espèce d'*Homo* présente sur Terre, comme actuellement.

Question 14

L'homme et le chimpanzé :

☐ **A.** présentent une faible similitude génétique.

☐ **B.** diffèrent par la chronologie et l'expression de certains gènes de développement.

☐ **C.** partagent un même caryotype.

☐ **D.** présentent des caractères morpho-anatomiques similaires.

Les relations entre organisation et mode de vie, résultat de l'évolution : l'exemple de la vie fixée des plantes

→ Le cours p. 30

Question 15

En raison de leur mode de vie fixé, les plantes à fleurs :

☐ **A.** présentent de vastes surfaces d'échange avec leur milieu.

☐ **B.** sont incapables de se défendre contre les agressions du milieu.

☐ **C.** ne peuvent pas se reproduire entre individus éloignés.

☐ **D.** ne peuvent pas coloniser de nouveaux milieux.

Question 16

En relation avec la vie fixée, les plantes ont développé :

☐ **A.** un système souterrain permettant des échanges de CO_2 avec le sol.

☐ **B.** un système souterrain permettant des échanges d'eau avec l'atmosphère.

☐ **C.** un système aérien permettant des échanges d'ions minéraux avec l'air.

☐ **D.** un système aérien et un système souterrain échangeant de la matière par des systèmes de vaisseaux.

Question 17

La collaboration entre les animaux et les plantes à fleurs :

☐ **A.** s'exerce lors de la pollinisation et de la dispersion des graines.

☐ **B.** s'exerce lors de la pollinisation et de la fécondation.

☐ **C.** s'exerce exclusivement lors de la pollinisation.

☐ **D.** s'exerce exclusivement lors de la dispersion des graines.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le domaine continental et sa dynamique

La caractérisation du domaine continental : lithosphère continentale, reliefs et épaisseur crustale

→ Le cours p. 38

Question 18

La différence d'altitude entre les continents (+870 m) et les océans (–3 870 m) s'explique par :

☐ **A.** une croûte continentale plus épaisse et plus dense que la croûte océanique.

☐ **B.** une croûte continentale moins épaisse, mais plus dense que la croûte océanique.

☐ **C.** une croûte continentale plus épaisse, mais moins dense que la croûte océanique.

☐ **D.** une croûte continentale moins épaisse et moins dense que la croûte océanique.

Question 19

La disparition d'une surcharge importante, comme une calotte glaciaire, de la lithosphère continentale entraîne :

☐ **A.** un épaississement de la croûte continentale.

☐ **B.** un amincissement de la croûte continentale.

☐ **C.** un mouvement vertical de la lithosphère continentale vers le bas.

☐ **D.** un mouvement vertical de la lithosphère continentale vers le haut.

Question 20

À partir d'un granite, le métamorphisme en domaine continental, lié à l'épaississement de la croûte, conduit à la formation :

☐ **A.** d'une rhyolite.

☐ **B.** d'un gabbro.

☐ **C.** d'un gneiss.

☐ **D.** d'une granodiorite.

Question 21

Le Moho se trouve à une plus forte profondeur au niveau des chaînes de montagnes, car :

☐ **A.** la croûte continentale est amincie.

☐ **B.** la croûte continentale est plus dense que le manteau.

☐ **C.** il y a une importante racine crustale.

☐ **D.** il y a empilement de terrains, visible à l'affleurement (plis, failles inverses, chevauchements).

Contexte de la formation des chaînes de montagnes et disparition des reliefs

→ Le cours p. 44

Question 22

Les ophiolites sont :

☐ **A.** constituées de granitoïdes.

☐ **B.** constituées uniquement de roches sédimentaires.

☐ **C.** des lambeaux de lithosphère océanique présents en domaine continental.

☐ **D.** caractéristiques des zones de subduction.

Question 23

Au niveau d'une chaîne de montagnes

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

intracontinentale, il s'est produit dans le passé :

☐ **A.** une subduction d'une lithosphère continentale sous une lithosphère océanique, puis une collision entre les deux lithosphères continentales.

☐ **B.** une subduction d'une lithosphère océanique sous une lithosphère continentale, puis une collision entre les deux lithosphères continentales.

☐ **C.** une subduction d'une lithosphère océanique sous une lithosphère continentale, puis une collision entre les deux lithosphères océaniques.

☐ **D.** une subduction d'une lithosphère continentale sous une lithosphère océanique, puis une collision entre les deux lithosphères océaniques.

Question 24

Dans une chaîne de montagnes, les reliefs tendent à :

☐ **A.** s'accentuer uniquement sous l'effet de l'altération et de l'érosion.

☐ **B.** s'accentuer sous l'effet de l'altération et de l'érosion, combinées à l'isostasie et associées à l'effondrement gravitaire

☐ **C.** disparaître uniquement sous l'effet de l'altération et de l'érosion.

☐ **D.** disparaître sous l'effet de l'altération et de l'érosion, combinées à l'isostasie et sous l'effet de l'effondrement gravitaire.

Le magmatisme en zone de subduction : une production de nouveaux matériaux continentaux

→ Le cours p. 50

Question 25

Dans les zones de subduction, le magma se forme par fusion :

☐ **A.** partielle des péridotites du manteau situé sous la croûte de la plaque chevauchante.

☐ **B.** totale des péridotites du manteau situé sous la croûte de la plaque chevauchante.

☐ **C.** partielle des péridotites du manteau situé sous la croûte de la plaque plongeante.

☐ **D.** totale des péridotites du manteau situé sous la croûte de la plaque plongeante.

Question 26

Dans les zones de subduction, on observe un métamorphisme :

☐ **A.** haute température au niveau de la plaque océanique plongeante, provoquant la déshydratation des roches de la croûte océanique.

☐ **B.** haute température au niveau de la plaque océanique plongeante, provoquant la déshydratation de la péridotite mantellique.

☐ **C.** haute pression au niveau de la plaque océanique plongeante, provoquant la déshydratation de la péridotite mantellique.

☐ **D.** haute pression au niveau de la plaque océanique plongeante, provoquant la déshydratation des roches de la croûte océanique.

Question 27

Au niveau d'une zone de subduction, le refroidissement en profondeur du magma forme des roches :

☐ **A.** à structure grenue de type granitoïde.

☐ **B.** à structure grenue de type andésitique.

☐ **C.** à structure microlithique de type granitoïde.

☐ **D.** à structure microlithique de type andésitique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Enjeux planétaires contemporains

Géothermie et propriétés thermiques de la Terre

→ Le cours p. 56

Question 28

L'énergie géothermique :

☐ **A.** provient de la désintégration d'éléments radioactifs contenus dans les roches terrestres.

☐ **B.** ne produit aucune manifestation à la surface de la Terre.

☐ **C.** est à l'origine d'un flux géothermique identique sur toute la surface terrestre.

☐ **D.** est utilisée par l'homme pour couvrir une très grande partie de ses besoins énergétiques.

Question 29

Dans la Terre, le transfert thermique s'effectue par :

☐ **A.** convection seulement.

☐ **B.** convection et conduction.

☐ **C.** l'intermédiaire du champ magnétique terrestre.

☐ **D.** la remontée de roches du noyau.

Question 30

Le flux géothermique est défini comme :

☐ **A.** la quantité d'énergie thermique dissipée par unité de temps et par unité de surface à la surface de la Terre.

☐ **B.** l'évolution de la température en fonction de la profondeur sous la surface terrestre.

☐ **C.** la quantité d'énergie thermique dissipée à la surface de la Terre.

☐ **D.** la variation de température entre deux points de la Terre.

La plante domestiquée

→ Le cours p. 60

Question 31

La domestication des plantes cultivées :

☐ **A.** est un processus qui a eu lieu en quelques années.

☐ **B.** correspond à une sélection artificielle, exercée par l'homme.

☐ **C.** a eu lieu dans les différentes régions du monde à la même époque.

☐ **D.** s'est portée sur les mêmes espèces végétales dans les différentes régions du monde.

Question 32

Le maïs Bt, un OGM résistant à un insecte herbivore, la pyrale du maïs, est :

☐ **A.** obtenu par une succession de croisements entre maïs résistants et maïs non résistants à la pyrale.

☐ **B.** porteur d'un génome identique à celui d'un maïs non résistant à la pyrale.

☐ **C.** autorisé à la culture dans tous les pays du monde.

☐ **D.** obtenu par transgénèse d'un gène conférant une résistance à cet insecte herbivore.

Question 33

La biodiversité des plantes cultivées :

☐ **A.** a tendance à diminuer par les méthodes modernes de sélection végétale privilégiant les variétés les plus productives.

☐ **B.** est identique au cours du temps.

☐ **C.** est à maintenir élevée, car il est important de conserver pour l'avenir des ressources génétiques variées.

☐ **D.** est diminuée lors la sélection variétale.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le maintien de l'intégrité de l'organisme : quelques aspects de la réaction immunitaire

La réaction inflammatoire, un exemple de réaction innée

→ Le cours p. 66

Question 34

La réaction inflammatoire aiguë :

☐ **A.** est caractérisée par des symptômes stéréotypés.

☐ **B.** diffère selon que le pathogène est rencontré pour la première fois ou a déjà été rencontré par l'organisme.

☐ **C.** diffère selon les pathogènes rencontrés.

☐ **D.** n'existe que chez les vertébrés.

Question 35

Les symptômes de la réaction inflammatoire aiguë (chaleur, gonflement, rougeur et douleur) sont la conséquence :

☐ **A.** de la sécrétion d'anticorps.

☐ **B.** de la vasoconstriction des capillaires sanguins.

☐ **C.** de l'action des médiateurs chimiques de l'inflammation.

☐ **D.** d'un afflux réduit de lymphe au niveau du site de l'inflammation.

Question 36

Les médiateurs chimiques de l'inflammation sont sécrétés :

☐ **A.** par les pathogènes.

☐ **B.** par les hématies.

☐ **C.** par les lymphocytes.

☐ **D.** par les cellules de l'immunité innée.

Question 37

Les médicaments anti-inflammatoires agissent en :

☐ **A.** en inhibant la synthèse des médiateurs chimiques de l'inflammation.

☐ **B.** en éliminant directement les pathogènes présents au niveau du site inflammatoire.

☐ **C.** en empêchant l'élimination des pathogènes par les cellules phagocytaires.

☐ **D.** en inhibant l'installation de la réponse adaptative.

Question 38

La phagocytose est réalisée :

☐ **A.** par les hématies.

☐ **B.** par les macrophages.

☐ **C.** par les granulocytes.

☐ **D.** par les lymphocytes.

Question 39

Les cellules dendritiques sont :

☐ **A.** des leucocytes.

☐ **B.** des hématies.

☐ **C.** des cellules ne circulant que dans le sang.

☐ **D.** des cellules présentatrices de l'antigène.

L'immunité adaptative, prolongement de l'immunité innée

→ Le cours p. 72

Question 40

Lors de la réponse immunitaire adaptative :

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **A.** les plasmocytes se différencient en lymphocytes cytotoxiques.
☐ **B.** il se produit un gonflement, une rougeur, une chaleur et une douleur au niveau de la zone infectée.
☐ **C.** les plasmocytes produisent des antigènes.
☐ **D.** les plasmocytes produisent des anticorps.

Question 41

Un anticorps :

☐ **A.** est composé de six chaînes peptidiques.
☐ **B.** possède un seul site de reconnaissance de l'antigène.
☐ **C.** possède des régions constantes reconnues par des récepteurs de la membrane plasmique des cellules phagocytaires.
☐ **D.** est capable de reconnaître des antigènes différents.

Question 42

La sélection clonale des lymphocytes T $CD8^+$ est suivie immédiatement de :

☐ **A.** leur multiplication clonale.
☐ **B.** la différenciation clonale en LT auxiliaires.
☐ **C.** la différenciation clonale en LT cytotoxiques.
☐ **D.** leur production d'interleukine 2.

Question 43

Les LT auxiliaires présentent la caractéristique suivante :

☐ **A.** ils sécrètent les anticorps.
☐ **B.** ils sont indispensables à la réaction immunitaire innée.
☐ **C.** ils sont cytotoxiques.
☐ **D.** ils sécrètent des médiateurs chimiques, activant la multiplication clonale et la différenciation clonale des lymphocytes.

Le phénotype immunitaire au cours de la vie

→ Le cours p. 78

Question 44

Par rapport à la réponse immunitaire adaptative primaire, la réponse immunitaire adaptative secondaire est :

☐ **A.** moins rapide mais quantitativement plus importante.
☐ **B.** plus rapide et quantitativement plus importante.
☐ **C.** plus rapide mais quantitativement moins importante.
☐ **D.** moins rapide et quantitativement moins importante.

Question 45

La vaccination consiste à injecter dans l'organisme des produits :

☐ **A.** immunogènes et pathogènes.
☐ **B.** non immunogènes mais pathogènes.
☐ **C.** ni immunogènes ni pathogènes.
☐ **D.** immunogènes mais non pathogènes.

Question 46

Le phénotype immunitaire :

☐ **A.** s'enrichit tout au long de la vie de l'individu.
☐ **B.** évolue selon les anticorps rencontrés naturellement.
☐ **C.** évolue selon les anticorps rencontrés lors des vaccinations.
☐ **D.** présente une évolution qui s'explique par la présence d'une mémoire immunitaire.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

Le réflexe myotatique, un exemple de commande réflexe du muscle

→ Le cours p. 84

Question 47

Le réflexe myotatique :

☐ **A.** nécessite l'intervention de plusieurs synapses.

☐ **B.** fait intervenir une seule synapse entre le neurone sensoriel et le neurone moteur.

☐ **C.** fait intervenir une seule synapse entre deux neurones moteurs.

☐ **D.** fait intervenir une seule synapse entre deux neurones sensoriels.

Question 48

Le neurone moteur, ou motoneurone, conduit un message nerveux :

☐ **A.** codé en amplitude de potentiel d'action vers le muscle effecteur.

☐ **B.** codé en amplitude de potentiel d'action vers le centre nerveux.

☐ **C.** codé en fréquence de potentiel d'action vers le muscle effecteur.

☐ **D.** codé en fréquence de potentiel d'action vers le centre nerveux.

Question 49

La moelle épinière, centre nerveux des réflexes myotatiques, est située sous le cerveau et présente :

☐ **A.** des racines dorsales par où passent les neurones sensoriels.

☐ **B.** des racines dorsales par où passent les neurones moteurs.

☐ **C.** des racines ventrales par où passent les neurones sensoriels.

☐ **D.** des racines ventrales par où passent les neurones moteurs.

Question 50

Au niveau de la synapse neuromusculaire :

☐ **A.** le message nerveux est de nature électrique.

☐ **B.** le message nerveux est de nature chimique.

☐ **C.** les neuromédiateurs sont libérés par le motoneurone et se fixent sur des récepteurs de la membrane plasmique du muscle.

☐ **D.** les neuromédiateurs sont libérés par le muscle et se fixent sur des récepteurs de la membrane plasmique du motoneurone.

Motricité volontaire et plasticité cérébrale

→ Le cours p. 88

Question 51

La commande des mouvements volontaires :

☐ **A.** ne fait intervenir que les muscles.

☐ **B.** fait intervenir le cerveau et la moelle épinière.

☐ **C.** ne fait intervenir que le cerveau.

☐ **D.** ne fait intervenir que la moelle épinière.

Question 52

Le cortex moteur droit commande les mouvements volontaires :

☐ **A.** de la partie gauche du corps.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **B.** de la partie droite du corps.
☐ **C.** des membres inférieurs droit et gauche.
☐ **D.** des membres supérieurs droit et gauche.

Question 53

Une fibre musculaire :

☐ **A.** se relâche lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un neurone sensoriel.
☐ **B.** se relâche lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un motoneurone.
☐ **C.** se contracte lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un neurone sensoriel.
☐ **D.** se contracte lorsqu'elle reçoit un message nerveux d'un motoneurone.

Question 54

Le cortex moteur regroupe différentes aires :

☐ **A.** qui fonctionnement indépendamment les unes des autres.
☐ **B.** qui sont entièrement déterminées dès la naissance.
☐ **C.** qui communiquent entre elles.
☐ **D.** situées dans le cerveau et dans la moelle épinière.

Question 55

La plasticité cérébrale :

☐ **A.** permet l'évolution des capacités motrices.
☐ **B.** ne s'observe que durant l'enfance.
☐ **C.** correspond aux modifications des réseaux de neurones.
☐ **D.** est indépendante des stimulations de l'environnement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Génétique et évolution

Question 1 : D.

Lors d'une méiose, une cellule dont l'ADN est préalablement répliqué subit deux divisions successives pour donner quatre cellules filles. Les lots chromosomiques des 4 cellules filles sont différents, car l'individu est hétérozygote pour un certain nombre de gènes et des brassages intra-chromosomique et interchromosomique ont lieu lors de la méiose. Les cellules filles ne possèdent qu'un seul des deux chromosomes de chaque paire présente initialement chez la cellule mère.

Question 2 : C.

Chaque division de la méiose, comme la mitose, se déroule en 4 phases : la prophase, la métaphase, l'anaphase et la télophase.

Question 3 : B.

À partir d'une cellule mère, la première division de la méiose forme deux cellules filles, qui contiennent chacune n chromosomes à 2 chromatides, c'est-à-dire un exemplaire d'un chromosome de chaque paire présente initialement dans la cellule mère. La seconde division de la méiose aboutit alors à 4 cellules filles contenant chacune n chromosomes à 1 chromatide chacun.

Question 4 : A et D.

Il est possible de mettre en évidence le brassage intrachromosomique en étudiant deux gènes liés, portés par le même chromosome. Dans le cas de deux gènes indépendants, un individu, hétérozygote pour les deux gènes étudiés, produit par un brassage interchromosomique 4 types de gamètes de manière équiprobable (fréquence de 25 % pour chaque type de gamètes). Le résultat d'un croisement-test avec un individu, homozygote récessif, donnera donc 4 types d'individus équiprobables (2 types parentaux et 2 types non parentaux, également appelés recombinés).

Question 5 : A.

La diversification du vivant s'opère par des modifications affectant le génome (mutations, transferts horizontaux de gènes entre espèces, hybridations d'espèces suivies de polyploïdisations, modifications des séquences régulatrices des gènes de développement), mais aussi par des modifications affectant le génome (symbiose, transmission culturelle).

Question 6 : A et C.

Les gènes contrôlant le développement des organismes présentent des séquences régulatrices qui peuvent différer selon les espèces. Ces séquences régulatrices contrôlent l'expression de ces gènes de développement, c'est-à-dire qu'elles sont à l'origine de variations de la localisation, de la chronologie et de l'intensité de l'expression de ces gènes selon les espèces. Ainsi les gènes de développement sont à l'origine de différences importantes dans la mise en place du plan d'organisation des espèces.

Question 7 : B et D.

Cet exemple montre une relation à bénéfices réciproques, caractéristique d'une symbiose, et les génomes des organismes ne sont pas modifiés. Il s'agit d'une diversification du vivant non liée à une modification du génome.

Question 8 : A et C.

La transmission des savoirs se fait aisément chez les chimpanzés, en liberté comme en captivité. Des chimpanzés découvrant une technique utilisée par un autre groupe, peuvent l'enseigner à la majorité des membres de leur groupe. Il s'agit d'un apprentissage par imitation, donc d'une diversification du vivant non liée à une modification du génome. Cette capacité d'apprentissage par imitation n'est pas observée que chez les primates : elle existe également chez les oiseaux.

Question 9 : A.

La dérive génétique est la modification au hasard de la fréquence des allèles d'un gène dans une population au cours du temps. Elle est d'autant plus marquée que la population est petite : la probabilité de disparition des allèles dans une petite population est d'autant plus forte. Cette disparition d'allèles contribue à réduire la diversité génétique de la population. La dérive génétique s'exerce sur les allèles qui ne sont pas soumis à la sélection naturelle, c'est-à-dire les allèles ni favorables ni défavorables dans un milieu donné.

Question 10 : C.

Le concept d'espèce est délicat à définir : on peut considérer qu'une espèce est une population d'individus interféconds et qui est isolée génétiquement d'autres populations. La similitude des caractères est le critère correspondant à la définition typologique de l'espèce. Un même nombre de chromosomes n'est pas un critère suffisant pour définir une espèce.

Question 11 : A.

La spéciation peut résulter d'un isolement reproducteur entre les populations d'une même espèce. La spéciation peut avoir lieu si les populations sont isolées géographiquement, mais ce n'est pas une condition suffisante. De plus, des cas de spéciation peuvent avoir lieu sans isolement géographique entre des populations.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 12 : C.
Dans le genre *Homo*, dont les différentes espèces fabriquent des outils, la capacité crânienne est importante, la face et les canines sont réduites. La présence des yeux orientés dans un même plan, vers l'avant, n'est pas un caractère distinctif du genre *Homo* mais est un caractère de primate. Toutes les espèces appartenant à la famille humaine sont bipèdes, même si elles n'appartiennent pas au genre *Homo*.

Question 13 : A.
Les premiers représentants du genre *Homo* seraient apparus en Afrique vers –2,5 Ma, et dès –1,8 Ma, des *Homo* seraient sortis d'Afrique. Les premiers *Homo sapiens* sont datés d'environ –200 000 ans en Afrique, puis ils sont sortis à leur tour d'Afrique. À plusieurs reprises dans l'histoire du genre *Homo*, plusieurs espèces *d'Homo* ont cohabité (comme *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis* entre environ –35 000 ans et –25 000 ans en Europe).

Question 14 : B.
L'homme et le chimpanzé présentent des caractères morpho-anatomiques différents, notamment ceux liés à la bipédie, qui n'est exclusive que chez l'homme. L'homme et le chimpanzé ont un caryotype différent (23 paires de chromosomes chez l'homme et 24 paires de chromosomes chez le chimpanzé). Ils présentent une forte similitude génétique (98,5 % des nucléotides de leurs génomes sont identiques). Certains gènes de développement présentent une chronologie et une intensité d'expression différentes entre l'homme et le chimpanzé, à l'origine des différences dans leurs caractères morpho-anatomiques.

Question 15 : A.
Malgré leur mode de vie fixé, les plantes ont développé des adaptations permettant d'échanger avec leur milieu, de se protéger des agressions de ce milieu, de se reproduire et de coloniser de nouveaux milieux.

Question 16 : D.
Les plantes possèdent un système racinaire souterrain permettant l'absorption d'eau et d'ions avec le sol, et un système foliaire aérien assurant l'échange de gaz (CO_2, O_2, H_2O) avec l'atmosphère. Les vaisseaux du xylème et du phloème permettent le transfert de matière dans la plante.

Question 17 : A.
Les animaux participent à la pollinisation (transport du pollen des étamines vers le pistil) et à la dispersion des graines.

Le domaine continental et sa dynamique

Question 18 : C.
La différence d'altitude entre les continents et les océans s'explique par une croûte continentale plus épaisse (30 km d'épaisseur en moyenne par rapport à 7 km pour la croûte océanique), mais moins dense que la croûte océanique (la densité de la croûte continentale est de 2,8 contre 2,9 pour la croûte océanique). Cette différence d'altitude s'explique également par le fait que les lithosphères continentale et océanique reposent toutes les deux en équilibre sur l'asthénosphère sous-jacente.

Question 19 : D.
La lithosphère continentale repose en équilibre sur l'asthénosphère sous-jacente : l'élimination d'une surcharge importante, comme une calotte glaciaire entraîne un déséquilibre isostatique, qui est suivi par mouvement vertical de la lithosphère continentale vers le haut jusqu'à l'établissement d'un nouvel équilibre isostatique.

Question 20 : C.
En domaine continental, un granite soumis à une augmentation de la pression et de la température, tout en restant à l'état solide, forme une roche métamorphique : le gneiss.

Question 21 : C et D.
La profondeur du Moho est plus élevée sous la chaîne de montagnes, car en surface les terrains s'empilent (plis, failles inverses, chevauchements) sous l'effet de la tectonique en compression. De plus, les chaînes de montagnes sont caractérisées par l'existence d'une racine crustale en profondeur.

Question 22 : C.
Les ophiolites sont des lambeaux de lithosphère océanique présents en domaine continental, constitués de péridotites, de gabbros et de basaltes. Les ophiolites témoignent de l'existence d'une ancienne lithosphère océanique et de la collision aboutissant à la formation d'une chaîne de montagnes.

Question 23 : B.
Les chaînes de montagnes résultent de la subduction d'une lithosphère océanique sous une lithosphère continentale, puis de la collision entre les deux lithosphères continentales. Plus précisément, malgré sa faible densité, une partie de la lithosphère continentale rentre en subduction sous l'autre lithosphère continentale.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 24 : D.
Dans une chaîne de montagnes, les reliefs tendent à disparaître sous l'effet de l'altération et de l'érosion, combinées à l'isostasie (qui fait remonter la racine crustale au fur et à mesure de l'élimination du relief en surface). De plus, l'effondrement gravitaire contribue à l'aplanissement du relief.

Question 25 : A.
Dans les zones de subduction, le magma se forme par fusion partielle des péridotites du manteau situé sous la plaque chevauchante. Cette fusion partielle des péridotites mantelliques est permise par leur hydratation avec l'eau libérée lors du métamorphisme des roches de la croûte de la plaque océanique plongeante.

Question 26 : D.
Dans les zones de subduction, un métamorphisme haute pression-basse température affecte les roches de la croûte océanique de la plaque plongeante. Ce métamorphisme dans le faciès schiste bleu puis éclogite se caractérise par la déshydratation des roches de la croûte océanique plongeante.

Question 27 : A.
Au niveau d'une zone de subduction, le refroidissement lent du magma en profondeur dans la croûte aboutit à la formation de roches à structure grenue, c'est-à-dire entièrement cristallisée, de type granitoïde.

Enjeux planétaires contemporains

Question 28 : A.
L'énergie géothermique a, pour principale origine, la désintégration d'éléments radioactifs contenus dans les roches terrestres. Cette énergie géothermique se dissipe et est à l'origine d'un flux géothermique variable selon le contexte géodynamique (dorsales, subduction…). Il existe de nombreuses manifestations de la dissipation de l'énergie géothermique à la surface du globe (sources chaudes, geysers, volcans). Enfin, cette énergie géothermique est exploitable par l'homme pour se fournir en énergie thermique et pour produire de l'électricité.

Question 29 : B.
Dans la Terre, les transferts thermiques s'effectuent par conduction (transfert thermique sans transfert de matière, qui est peu efficace) et par convection (transfert thermique associé à un transfert de matière, qui est plus efficace que la convection).

Question 30 : A.
Le flux géothermique est la quantité d'énergie thermique dissipée par unité de temps et par unité de surface à la surface de la Terre. L'unité du flux géothermique est donc le $W.m^{-2}$. L'évolution de la température en fonction de la profondeur sous la surface terrestre est le géotherme.

Question 31 : B.
La domestication est une sélection artificielle, exercée par l'homme, à partir d'espèces végétales sauvages. L'homme a retenu des caractéristiques favorables à la culture des plantes et à leur utilisation. C'est un processus progressif qui s'étale sur de nombreuses années. La domestication des plantes cultivées a eu lieu dans différentes régions du monde en différents moments (environ entre -10 000 ans et -2 000 ans) et a concerné des espèces végétales variées selon les régions : par exemple, le blé au Moyen-Orient et le maïs en Amérique centrale.

Question 32 : D.
La transgénèse permet de transférer un gène d'intérêt à des organismes, qui présentent alors un caractère intéressant pour leur culture ou leur utilisation, comme la résistance à la pyrale chez le maïs transgénique Bt. Le génome de ces OGM est donc modifié et diffère des végétaux non transgéniques. Les OGM, comme le maïs Bt, sont cultivés dans certains pays (États-Unis, Brésil, Espagne…), mais leur culture est actuellement interdite dans d'autres pays dont la France.

Question 33 : A et C.
La biodiversité de plantes cultivées varie dans le temps : par exemple, elle augmente lors la sélection variétale. Actuellement, la majorité des espèces cultivées modernes présente de forts rendements, mais leur grande homogénéité contribue à la baisse actuelle de la biodiversité des plantes cultivées. Il est important de maintenir une biodiversité assez élevée pour disposer de ressources génétiques pour le futur.

Le maintien de l'intégrité de l'organisme : quelques aspects de la réaction immunitaire

Question 34 : A.
La réaction inflammatoire aiguë, réaction essentielle

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

de la réponse immunitaire innée, existe chez tous les animaux : elle se caractérise par des symptômes stéréotypés (chaleur, rougeur, gonflement et douleur). Elle est indépendante de la nature du pathogène rencontré et est identique que le pathogène ait déjà été rencontré ou non par l'organisme.

Question 35 : C.

Les symptômes de la réaction inflammatoire sont la conséquence d'une vasodilatation des capillaires sanguins, entraînant un afflux de sang (d'où la rougeur) et de lymphe, à l'origine de la chaleur et du gonflement. La détection par les cellules sentinelles des pathogènes entraîne la libération des médiateurs chimiques de l'inflammation à l'origine des symptômes inflammatoires. Les anticorps seront produits ultérieurement lors de la réponse immunitaire adaptative.

Question 36 : D.

En réaction à la présence des pathogènes, les cellules de l'immunité innée (cellules dendritiques, mastocytes et macrophages) sécrètent les médiateurs chimiques de l'inflammation, qui déclenchent les symptômes de la réaction inflammatoire.

Question 37 : A.

Les médicaments anti-inflammatoires limitent l'inflammation en inhibant la synthèse des médiateurs chimiques de l'inflammation, ce qui réduit les symptômes gênants. Les médicaments anti-inflammatoires n'empêchent pas l'élimination des pathogènes par les cellules phagocytaires, ni l'installation de la réponse adaptative.

Question 38 : B et C.

Les cellules réalisant la phagocytose sont les macrophages et les granulocytes. Les lymphocytes n'interviennent que dans la réponse adaptative tandis que les hématies, ou globules rouges, sont responsables du transport du dioxygène dans le sang et ne participent pas à l'immunité.

Question 39 : A et D.

Les cellules dendritiques sont des leucocytes, circulant dans les tissus et capables de phagocyter les pathogènes et de présenter les antigènes issus de ces pathogènes au sein de leurs récepteurs membranaires, appelés CMH (complexe majeur d'histocomptabilité), à d'autres cellules immunitaires, afin de déclencher la réponse immunitaire adaptative. Les cellules dendritiques sont donc des cellules présentatrices de l'antigène.

Question 40 : D.

La réponse immunitaire innée, avec la mise en place de la réaction immunitaire inflammatoire, est responsable des symptômes inflammatoires (gonflement, rougeur, chaleur et douleur) et déclenche la réponse immunitaire adaptative. Lors de la réponse adaptative, les lymphocytes B spécifiques de l'antigène sont activés par sélection clonale, se multiplient, puis se différencient en plasmocytes sécrétant de nombreux anticorps spécifiques de l'antigène. Les LTCD8$^+$ spécifiques de l'antigène sont également sélectionnés, se multiplient et se différencient en lymphocytes cytotoxiques.

Question 41 : C.

Un anticorps est composé de quatre chaînes peptidiques, dont deux chaînes lourdes et deux chaînes légères. Les extrémités variables des chaînes forment deux sites de reconnaissance de l'antigène. L'extrémité constante des chaînes lourdes est reconnue par des récepteurs de la membrane plasmique des cellules phagocytaires, permettant la phagocytose des complexes anticorps-antigène. Un anticorps donné n'est spécifique que d'un seul antigène.

Question 42 : A.

Lors de la présentation de l'antigène par une cellule présentatrice de l'antigène aux LT CD8$^+$, les LT CD8$^+$ spécifiques de l'antigène sont sélectionnés, se multiplient puis se différencient en lymphocytes cytotoxiques. Ces deux dernières étapes nécessitent la présence d'interleukine 2, sécrétée par les LT CD4$^+$ activés, également appelés LT auxiliaires.

Question 43 : D.

Les LT auxiliaires ne sécrètent pas des anticorps, qui sont produits par les plasmocytes (également appelés LB sécréteurs d'anticorps). Les LT auxiliaires ne sont pas des lymphocytes cytotoxiques, qui sont formés à partir des LT CD8$^+$. Les LT auxiliaires, issus des LT CD4$^+$, sont indispensables à la réaction immunitaire adaptative, car ils sécrètent des médiateurs chimiques (comme l'interleukine 2), qui activent la multiplication clonale et la différenciation clonale des LB, des LT CD8$^+$ et d'eux-mêmes.

Question 44 : B.

Lorsque l'organisme rencontre un pathogène qu'il a déjà rencontré, la réponse immunitaire est plus rapide et quantitativement plus importante que lors d'un premier contact avec le pathogène. L'efficacité accrue de la réponse immunitaire secondaire est due à la mémoire immunitaire.

Question 45 : D.

La vaccination consiste en l'injection d'un agent vaccinant constitué de pathogènes tués ou atténués ou de fragments de pathogènes. Ces agents vaccinants doivent être suffisamment immunogènes pour déclencher une réponse immunitaire avec mise en place d'une mémoire immunitaire,

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

sans être pathogènes afin que l'individu vacciné ne déclare pas la maladie contre laquelle il est vacciné.

Question 46 : A et D.
Le phénotype immunitaire d'un individu est sa capacité à répondre aux pathogènes qu'il rencontre : il s'enrichit en fonction des antigènes rencontrés naturellement, mais aussi en fonction de ceux rencontrés – artificiellement – lors des vaccinations. C'est la présence d'une mémoire immunitaire qui explique cette capacité d'évolution du phénotype immunitaire.

Neurone et fibre musculaire : la communication nerveuse

Question 47 : B.
Le réflexe myotatique est responsable de mouvements involontaires dont le centre nerveux est situé dans la moelle épinière. Les réflexes myotatiques sont monosynaptiques, car l'arc réflexe constituant l'ensemble du circuit nerveux ne fait intervenir qu'une seule synapse entre le neurone sensoriel et le neurone moteur. Cette synapse est située dans la substance grise de la moelle épinière.

Question 48 : C.
Le neurone moteur transmet les informations nerveuses du centre nerveux situé dans la moelle épinière vers le muscle effecteur. Le message nerveux est codé en fréquence de potentiel d'action. Le potentiel d'action constitue un signal nerveux élémentaire, ayant toujours la même amplitude et la même durée.

Question 49 : A et D.
La moelle épinière est un centre nerveux situé sous le cerveau. Les neurones sensoriels cheminent par les racines dorsales, puis, au niveau d'une synapse située dans la substance grise de la moelle épinière, ils sont en contact avec le neurone moteur (ou motoneurone). Le motoneurone chemine alors par les racines ventrales de la moelle épinière et rejoint les muscles.

Question 50 : B et C.
La synapse neuromusculaire est la zone de contact entre le motoneurone et la cellule musculaire. L'arrivée d'un message nerveux dans le motoneurone déclenche la libération par le motoneurone de neuromédiateurs dans la fente synaptique. Les neuromédiateurs se fixent sur des récepteurs de la membrane plasmique de la cellule musculaire, entraînant un potentiel d'action musculaire, à l'origine de la contraction du muscle. Au niveau de la synapse neuromusculaire, le message nerveux est de nature chimique et son intensité est codée en concentration de neurotransmetteurs.

Question 51 : B.
La commande des mouvements volontaires fait intervenir le cerveau et la moelle épinière. Dans le cerveau, le cortex moteur regroupe différentes aires motrices, d'où partent des neurones reliés à la moelle épinière.

Question 52 : A.
Les voies de la commande de la motricité volontaire sont croisées : le cortex moteur droit commande donc les mouvements volontaires de la partie gauche du corps. Le cortex moteur gauche commande inversement les mouvements volontaires de la partie droite du corps.

Question 53 : D.
Une fibre musculaire est innervée par un seul motoneurone et elle se contracte lorsqu'elle reçoit le message nerveux du motoneurone.

Question 54 : C.
Le cortex moteur contient plusieurs aires cérébrales : aire motrice primaire, aire prémotrice, aire motrice supplémentaire et cortex pariétal. Ces différences aires cérébrales échangent des informations pour permettre la commande des mouvements volontaires. Les cartes motrices (régions du cortex moteur activées lors d'un mouvement volontaire) évoluent au cours de la vie, en fonction notamment des apprentissages, et elles ne sont donc pas totalement déterminées à la naissance.

Question 55 : A et C.
La plasticité cérébrale consiste en des modifications des réseaux de neurones. Cette plasticité cérébrale dépend des stimulations de l'environnement : elle est particulièrement intense durant l'enfance, mais elle se poursuit le reste de la vie de l'individu, permettant l'évolution des capacités motrices.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2020. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.